



TUGAS AKHIR – TL 141584

**ANALISIS KEGAGALAN *WATER INJECTION*
PADA *VERTICAL ROLLER MILL* DI *FINISH MILL*
PT. HOLCIM TUBAN PLANT INDONESIA**

ANDIKA PRATAMA
NRP. 2713 100 039

Dosen Pembimbing
Dr. Agung Purniawan, ST., M.Eng
Alvian Toto Wibisono, ST., MT

JURUSAN TEKNIK MATERIAL DAN METALURGI
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2016



TUGAS AKHIR - TL141584

ANALISIS KEGAGALAN *WATER INJECTION* PADA *VERTICAL ROLLER MILL* DI *FINISH MILL* PT. HOLCIM TUBAN PLANT INDONESIA

Andika Pratama
NRP. 2713 100 039

Dosen Pembimbing :
Dr. Agung Purniawan, ST., M.Eng
Alvian Toto Wibisono, ST., MT

JURUSAN TEKNIK MATERIAL DAN METALURGI
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2016

(Halaman ini sengaja dikosongkan)



FINAL PROJECT - TL141584

FAILURE ANALYSIS OF WATER INJECTION IN VERTICAL ROLLER MILL AT FINISH MILL PT. HOLCIM TUBAN PLANT INDONESIA

Andika Pratama
NRP. 2713 100 039

Advisor :

Dr. Agung Purniawan, ST., M.Eng
Alvian Toto Wibisono, ST., MT

MATERIALS AND METALLURGICAL ENGINEERING DEPARTMENT
FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2016

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

**ANALISIS KEGAGALAN *WATER INJECTION* PADA
VERTICAL ROLLER MILL DI *FINISH MILL*
PT. HOLCIM TUBAN PLANT INDONESIA**

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Bidang Studi Korosi dan Analisa Kegagalan
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Material dan Metalurgi
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

Andika Pratama
NRP. 2713 100 039

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Dr. Agung Purniawan ST., M.Eng (Pembimbing I)
2. Alvia Toto Wibisono ST., MT (Pembimbing II)



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

Analisis Kegagalan *Water Injection* pada *Vertical Roller Mill* di *Finish Mill* PT. Holcim Tuban Plant Indonesia

Nama : Andika Pratama
NRP : 2713 100 039
Jurusan : Teknik Material dan Metalurgi
Dosen Pembimbing : Dr. Agung Purniawan, ST., M.Eng
Alvian Toto Wibisono, ST., MT

Abstrak

Vertical Roller Mill (VRM) merupakan salah satu *equipment* penting yang digunakan oleh PT. Holcim Tuban Plant Indonesia untuk kegiatan *grinding material*. Vibrasi berlebih yang ditimbulkan oleh VRM menyebabkan operasi VRM harus diberhentikan. *Water injection* ditambahkan pada VRM sebagai komponen yang mampu mengurangi vibrasi berlebih yang terjadi. Namun, belum dapat dimaksimalkan akibat kegagalan yang terjadi. Penelitian kali ini bertujuan untuk menganalisa kegagalan pada *water injection*. Beberapa pengujian dilakukan untuk mendukung hasil analisis. Uji unsur didapatkan material *water injection* berkesesuaian komposisinya dengan SS 301L. Pengamatan makroskopik menunjukkan adanya deformasi, penipisan, dan patahan pada permukaan pipa *water injection*. Pengamatan mikroskopik menunjukkan struktur mikro daerah yang terdeformasi mengalami *strain hardening*. Dari uji senyawa didapatkan γ -Fe sebagai fasa dominan dari material *water injection*. Uji fraktografi menunjukkan pola patahan yang terjadi yaitu *initial crack*, *crack propagation*, dan *final crack*. Dan uji kekerasan menunjukkan adanya peningkatan nilai kekerasan di daerah dekat dengan kegagalan, dari 238 BHN menjadi 268 BHN. Tahapan kegagalan yang terjadi adalah deformasi, penipisan, dan patah. Faktor yang menyebabkan kegagalan adalah pemilihan material, deformasi, dan penipisan yang mengakibatkan patah.

Kata kunci: Vertical Roller Mill, Water Injection, SS 301L, Deformasi, Patah.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

***Failure Analysis of Water Injection in Vertical Roller Mill at
Finish Mill PT. Holcim Tuban Plant Indonesia***

Name : Andika Pratama
SRN : 2713 100 039
Major : ***Materials and Metallurgical Engineering***
Advisor : ***Dr. Agung Purniawan, ST., M.Eng***
 Alvian Toto Wibisono ST., MT

Abstract

Vertical Roller Mill (VRM) is one of the important equipment that used by PT. Holcim Tuban Plant Indonesia for material grinding activities in order to increase the cement production. During the process of reduction of material at VRM, it often causes high vibration. It makes the operation of VRM must be stopped. Water injection was added to the VRM as a component to reduce the excessive vibration. However, it has not been able to maximize the production process due to failure water injection. This experiment has a goal to analyze the failure of water injection. A few tests were conducted to support the analysis result. Element testing obtained water injection material corresponds with SS 301L. Macroscopic observation showed deformation, thinning, and fracture on the surface of water injection pipeline. Microscopic observation showed the microstructure of deformed area is subjected to strain hardening. Compound testing obtains γ -Fe as dominant phase of water injection material. Then fractography testing shows fracture patterns that occur are initial crack, crack propagation, and final crack. And hardness testing shows increasing of hardness from base material to the area close to failure are from 238 BHN to 268 BHN. Stages failure that happened was deformation, thinning, and fracture. Factor that causing the failure is material selection, deformation, and thinning then fracture.

Keyword: Vertical Roller Mill, Water Injection, SS 301L, Deformation, Fracture.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadiran Allah SWT yang telah memberikan rahmat, anugerah, serta karunia-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir serta menyusun laporan Tugas Akhir dengan judul “**Analisis Kegagalan *Water Injection* pada *Vertical Roller Mill* di *Finish Mill* PT. Holcim Tuban Plant Indonesia**”. Laporan tugas akhir ini dibuat untuk melengkapi Mata Kuliah Tugas Akhir yang menjadi salah satu syarat kelulusan mahasiswa di Jurusan Teknik Material dan Metalurgi Fakultas Teknologi Industri Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Penulis menyadari bahwa tanpa bantuan dan dukungan dari berbagai pihak, laporan tugas akhir ini tidak dapat terselesaikan dengan baik. Oleh karena itu, penulis ingin mengucapkan terimakasih kepada pihak yang telah memberikan dukungan, bimbingan, dan kesempatan kepada penulis hingga laporan tugas akhir ini dapat diselesaikan, diantaranya:

1. Kedua orang tua dan keluarga yang telah memberikan banyak doa, dukungan, semangat, cinta kasih, motivasi, dan inspirasi.
2. Dr. Agung Purniawan, ST, M,Eng dan Alvian Toto Wibisono ST., MT. selaku dosen pembimbing Tugas Akhir penulis yang telah membimbing dan memberikan banyak ilmu selama pengerjaan tugas akhir ini.
3. Mas Essa Abubakar selaku pembimbing dari PT. Holcim Tuban Plant Indonesia yang telah membimbing dan memberikan banyak ilmu selama pengerjaan tugas akhir ini.
4. Dr. Agung Purniawan, ST., M,Eng selaku Ketua Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI – ITS.
5. Dr. Eng. Hosta Ardhyanta ST., M.Sc. selaku Koordinator Tugas Akhir Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS.

6. Amaliya Rasyida ST., M.Sc. selaku dosen wali yang sangat mengayomi selama penulis menjalani pendidikan di Jurusan Teknik Material dan Metalurgi.
7. Seluruh dosen dan karyawan Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS yang telah membimbing penulis hingga terciptanya laporan ini.
8. Rekan-rekan mahasiswa Teknik Material dan Metalurgi angkatan 2013, 2014, dan 2015.
9. Serta seluruh pihak yang belum bisa dituliskan satu per satu oleh penulis. Terimakasih atas dukungan dan bantuan teman-teman sekalian.

Penulis berharap laporan tugas akhir ini dapat bermanfaat bagi seluruh pihak yang membaca. Penulis juga menyadari masih terdapat banyak kekurangan dalam penulisan laporan tugas akhir ini, sehingga penulis sangat menerima kritik dan saran dari para pembaca yang dapat membangun demi kesempurnaan laporan tugas akhir ini.

Surabaya, 28 Desember 2016
Penulis,

Andika Pratama
2713100039

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	v
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	ix
KATA PENGANTAR	xi
DAFTAR ISI	xiii
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR TABEL	xix
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Permasalahan	2
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Batasan Masalah	3
1.5 Manfaat Penelitian	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Vertical Roller Mill	5
2.2 Water Injection	6
2.3 Baja	7
2.4 Baja Tahan Karat	8
2.5 Analisa Kegagalan	11
2.5.1 Faktor Penyebab Kegagalan	12
2.5.2 Prosedur Dalam Analisa Kegagalan	14
2.6 Deformasi pada Kristal Metalik	15
2.7 Patah Getas dan Patah Ulet	17
2.7.1 Patahan Ulet	18
2.7.2 Patahan Getas	21
2.8 Mekanisme Pembentukan Patah Lelah	23
2.8.1 Tahap Retak Awal (<i>Crack Initiation</i>)	24
2.8.2 Tahap Perambatan Retak (<i>Crack Propagation</i>)	25
2.9 Karakteristik Patahan	26
BAB III METODOLOGI	
3.1 Diagram Alir	29
3.2 Metode Penelitian	30

3.3 Material.....	30
3.4 Peralatan	31
3.5 Tahapan Penelitian.....	32
3.5.1 Review Dokumen Perusahaan	32
3.5.2 Preparasi Spesimen.....	32
3.5.3 Uji Komposisi Unsur	33
3.5.4 Pengamatan Makroskopik	33
3.5.5 Pengamatan Mikroskopik	33
3.5.6 Uji Fraktografi	35
3.5.7 Uji Senyawa.....	36
3.5.8 Uji Kekerasan	38
3.5.9 Perhitungan Ketebalan Dinding Pipa Terhadap Tekanan Internal.....	38
3.6 Rancangan Penelitian.....	39
BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN	
4.1 Analisis Data.....	41
4.1.1 Record Water Injection di Vertical Roller Mill.....	41
4.1.2 Uji Komposisi Unsur	42
4.1.3 Pengamatan Makroskopik	42
4.1.4 Pengamatan Mikroskopik	45
4.1.5 Uji Senyawa.....	48
4.1.6 Uji Fraktografi	49
4.1.7 Uji Kekerasan	51
4.1.8 Ketebalan Dinding Pipa Terhadap Tekanan Internal.....	53
4.1.9 Nilai <i>Microstrain Broadening</i>	53
4.2 Pembahasan	54
4.2.1 Mekanisme Kegagalan.....	58
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	
5.1 Kesimpulan	63
5.2 Saran	63
DAFTAR PUSTAKA.....	xxi
LAMPIRAN	xxiii
BIODATA PENULIS	lv

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Peta lokasi produksi dan distribusi PT. Holcim Indonesia.....	1
Gambar 2.1 Vertical Roller Mill	5
Gambar 2.2 Water Injection pada Vertical Roller Mill.....	6
Gambar 2.3 Klasifikasi Baja Tahan Karat	9
Gambar 2.4 Deformasi pada struktur kristal (a) <i>original lattice</i> , (b) deformasi elastis tanpa perubahan permanen pada posisi atom, (c) deformasi plastis mengakibatkan perpindahan posisi atom secara permanen	15
Gambar 2.5 Pengaruh dislokasi terhadap struktur <i>lattice</i> akibat tekanan	16
Gambar 2.6 Bentuk Patahan (a) ulet, (b) ulet setelah terjadi <i>necking</i> , (c) getas tanpa terjadi deformasi plastis	19
Gambar 2.7 Tahap patahan cup dan cone (a) awal <i>necking</i> , (b) terbentuknya <i>cavity</i> kecil, (c) pengumpulan <i>cavity</i> hingga menjadi retakan, (d) perambatan retak, (e) patahan geser dengan sudut 45° terhadap arah tegangan	19
Gambar 2.8 Penampakan (a) patah ulet (<i>cup and cone</i>) pada aluminium, dan (b) patah getas pada <i>mild steel</i>	20
Gambar 2.9 Hasil SEM (a) <i>spherical dimple</i> karakteristik, patahan hasil beban tarik <i>unixial</i> , 3300x, dan (b) <i>spherical dimple</i> karakteristik hasil beban geser, 5000x	21
Gambar 2.10 Penampakan foto (a) bentuk V “chevron” sebagai karakteristik patah getas dan (b) permukaan patah getas daerah asal retakan	21
Gambar 2.11 (a) skema perambatan retak yang melewati butir (<i>transgranular</i>) (b) hasil SEM dari patah secara transgranular ...	22
Gambar 2.12 (a) skema perambatan retak yang terjadi sepanjang batas butir (<i>intergranular</i>) (b) hasil SEM dari patah secara <i>intergranular</i>	23
Gambar 2.13 Mekanisme patah lelah dan faktornya.....	23
Gambar 2.14 Model Wood untuk pengintian retak.....	24

Gambar 2.15 Mekanisme penumpulan ujung retakan secara plastis (a) beban nol (b) beban tarik kecil (c) beban tarik maksimum (d) beban tekan maksimum (e) beban nol (f) beban tarik kecil	25
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian	29
Gambar 3.2 Komponen <i>water injection</i>	31
Gambar 3.3 Komponen <i>water injection</i> yang mengalami kegagalan	31
Gambar 3.4 Permukaan <i>water injection</i> yang mengalami kegagalan	31
Gambar 3.5 (a) Kamera merk Canon tipe SLR (b) Stereomicroscope.....	33
Gambar 3.6 Mikroskop Optik Olympus BX51M-RF	35
Gambar 3.7 Mesin SEM –EDAX FEI type Inspect S-50.....	36
Gambar 3.8 Mesin XRD PANanalytical	37
Gambar 4.1 Daerah pada <i>water injection</i> yang mengalami kegagalan	41
Gambar 4.2 Pengamatan makroskopik permukaan spesimen <i>water injection</i>	42
Gambar 4.3 Pengamatan pola permukaan patahan pada daerah (a) <i>initial crack</i> dan (b) <i>final crack</i>	42
Gambar 4.4 Deformasi dan penipisan pada spesimen <i>water injection</i>	42
Gambar 4.5 Deposit material pada bagian dalam pipa (a) sekitar lubang, dan (b) tepat di lubang <i>water injection</i>	43
Gambar 4.6 Pengamatan mikroskopik pada permukaan daerah (a) tidak mengalami patahan, dan (b) mengalami patahan	44
Gambar 4.7 Pengamatan mikroskopik pada <i>cross section</i> daerah (a) tidak mengalami deformasi, dan (b) mengalami deformasi ..	45
Gambar 4.8 Hasil XRD permukaan dalam pipa <i>raw material water injection</i> dan daerah yang mengamai kegagalan	46
Gambar 4.9 Hasil XRD deposit material yang terdapat pada bagian dalam pipa <i>water injection</i>	47
Gambar 4.10 Hasil SEM pada perpatahan daerah (a) <i>initial crack</i> , (b) <i>crack propagation</i> , dan (c) <i>final crack</i>	48

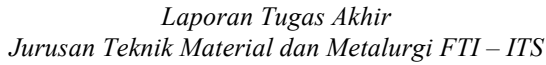
Gambar 4.11 Daerah indentasi pengujian kekerasan pada <i>water injection</i>	49
Gambar 4.12 Grafik persebaran nilai kekerasan pada <i>water injection</i>	50
Gambar 4.13 Ilustrasi tahapan kegagalan <i>water injection</i>	57

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Jenis-jenis Baja Tahan Karat	8
Tabel 2.2 Permasalahan dalam Kegagalan Komponen Mesin....	12
Tabel 2.3 Kasus Kegagalan Material Akibat Perawatan Komponen Mesin.....	13
Tabel 2.4 Penyebab Kegagalan dalam Komponen Mesin	14
Tabel 3.1 Rancangan Penelitian.....	39
Tabel 4.1 Dimensi dan Operasi Water Injection PT. Holcim Tuban Plant Indonesia	41
Tabel 4.2 Data Operasi Vertical Roller Mill di Finish Mill 1 PT. Holcim Tuban Plant Indonesia	41
Tabel 4.3 Perbandingan Hasil Uji Komposisi Unsur Komponen Water Injection dengan SS 301L	42
Tabel 4.4 Nilai Kekerasan pada <i>Water Injcetion</i> Berdasarkan Area Indentasi	52
Tabel 4.5 Data XRD dan <i>Microstrain Broadening</i> pada Permukaan <i>Fail Water Injection</i>	54
Tabel 4.6 Data XRD dan <i>Microstrain Broadening</i> pada Permukaan <i>Raw Water Injection</i>	54

(Halaman ini sengaja dikosongkan)





memproduksi sekitar 260 ton per jam semen. Untuk mendukung produksi maka digunakan *Vertical Roller Mill* (VRM). VRM berfungsi untuk mereduksi ukuran material semen dari ukuran yang besar ke ukuran yang lebih kecil sesuai dengan standar. Namun, proses reduksi ukuran material semen pada VRM seringkali menimbulkan vibrasi yang cukup besar. Besarnya vibrasi pada VRM dapat menyebabkan operasi berhenti.

Salah satu pencegahan terjadinya vibrasi yang berlebih adalah dengan ditambahkan komponen *water injection* pada VRM. Namun, hal tersebut belum dapat dimaksimalkan sehingga menyebabkan berbagai masalah yang merugikan proses produksi dan *maintenance*. Masalah yang sering timbul meliputi penyumbatan lubang *water injection* dan deformasi yang terjadi pada pipa *water injection*. Penyumbatan lubang *water injection* diakibatkan oleh masuknya material semen dan akhirnya mengering di dalam pipa *water injection*. Sementara deformasi yang dialami oleh pipa *water injection* diantaranya kebocoran dan penipisan ukuran pipa *water injection*. Kegagalan tersebutlah yang menyebabkan *water injection* tidak dapat beroperasi secara optimal dan hal ini mengakibatkan kegiatan *grinding material* terhambat.

Oleh karena itu, penelitian ini diperlukan untuk menganalisa kegagalan pada *water injection*. Sehingga kegagalan *water injection* tersebut tidak terulang kembali dan dapat mendukung produksi semen di PT. Holcim Tuban Plant Indonesia.

1.2 Rumusan Permasalahan

Rumusan permasalahan yang akan dikaji dalam analisa kegagalan ini adalah menganalisa yang terjadi pada *water injection* dengan perumusan masalah sebagai berikut:

1. Apa saja faktor-faktor yang menyebabkan kegagalan pada *water injection*?
2. Bagaimana mekanisme kegagalan yang terjadi pada *water injection*?

BAB I PENDAHULUAN



1.3 Tujuan Penelitian

Sesuai dengan permasalahan yang telah disebutkan, maka tujuan penelitian ini antara lain:

1. Menganalisa faktor-faktor penyebab kegagalan pada *water injection*
2. Menganalisa mekanisme kegagalan yang terjadi pada *water injection*

1.4 Batasan Masalah

Agar penelitian ini menjadi terarah dan memberikan kejelasan analisa permasalahan, maka dilakukan pembatasan permasalahan, yaitu:

1. Temperatur fluida yang mengalir di dalam *water injection* dianggap konstan
2. Tekanan dan debit fluida yang mengalir di dalam *water injection* dianggap konstan
3. Desain *water injection* dianggap memenuhi standar operasional

1.5 Manfaat Penelitian

Hasil dari penelitian ini diharapkan mampu memberi manfaat kepada seluruh pihak yang berkaitan, yaitu mahasiswa sebagai pelaksana penelitian mampu memahami serta mengaplikasikan ilmu yang telah didapat khususnya cabang ilmu material dan metalurgi, PT. Holcim Tuban Plant Indonesia sebagai pihak utama yang menyokong penelitian dapat menerapkan hasil penelitian untuk:

1. Masukan untuk hal-hal yang dapat dilakukan agar kegagalan pada *water injection* dapat ditanggulangi
2. Referensi pemilihan bahan serta *maintenance* pada *water injection*



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

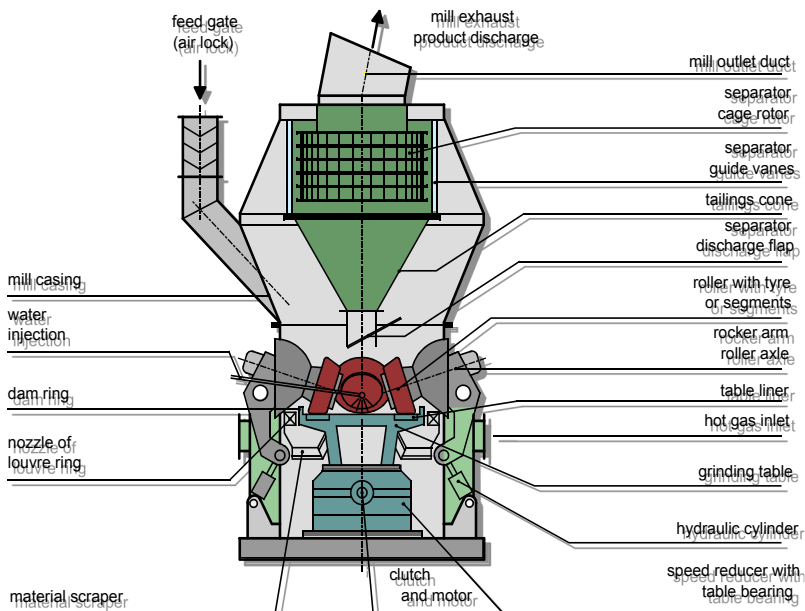


BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Vertical Roller Mill

Vertical Roller Mill (VRM) adalah alat yang digunakan untuk mereduksi material menjadi ukuran yang lebih kecil, selain itu VRM juga memiliki fungsi sebagai pengering, alat transport dan juga sebagai penyaring material.

VRM di PT Holcim Tuban Plant Indonesia ini memiliki spesifikasi blaine 4000 cm²/gram dan residue adalah 3%. Dan produksi 260 ton per jam. Komponen-komponen pada VRM dapat dilihat pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 *Vertical Roller Mill* (Jensen, 2011)

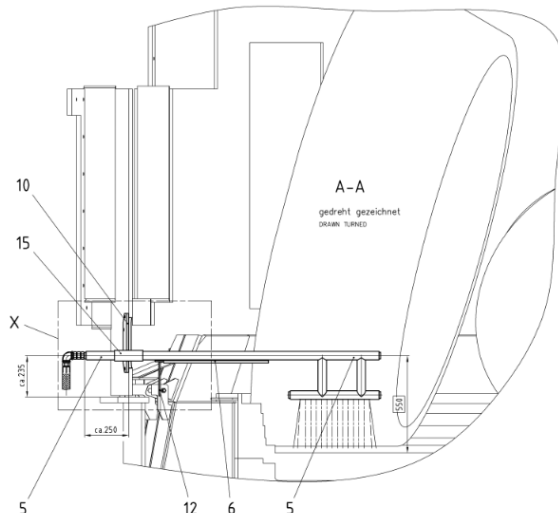
Cara kerja dari VRM adalah material masuk melalui saluran *feed gate* dan turun tepat ditengah *rotary table*.



Pergerakan sentrifugal pada *rotary table* menyebabkan material semen akan terbawa menjauhi tengah *rotary table* dan akan digiling oleh *main roller* dan *support roller* hingga ukurannya mengecil sesuai dengan standar. Lalu material yang telah tereduksi akan terbawa oleh hisapan *fan* ke atas dan akan disaring oleh *separator*. Material yang masih berukuran besar akan kembali ke *rotary table* atau akan terbuang ke *material scrapper* (Jensen, 2011).

2.2 Water Injection

Water injection adalah salah satu komponen dari *Vertical Roller Mill*. *Water injection* adalah alat yang dapat mempengaruhi ketinggian *grinding bed* (wadah untuk material semen yang akan di-roll). Dalam proses di *cement mill*, *water injection* menjadi sangat penting karena dapat menyetabilkan *grinding bed* secara signifikan dan membuat operasi menjadi lancar dan halus.



Gambar 2.2 *Water Injection* pada *Vertical Roller Mill*



Terdapat 3 *water injection* yang dipasang diantara *support roller* dan *master roller*. Ketiganya berbahan stainless steel dengan spesifikasi 1" SCH 40S X 6M. WLD ASTM A312. Bahan ini dipilih karena ringan dan memiliki sifat tahan korosi yang baik. Disebabkan jumlah air yang disemprotkan tidak terlalu banyak, maka tidak akan banyak mempengaruhi proses pengeringan di dalam VRM. Gambar 2.2 menunjukkan posisi *water injection* didalam VRM.

2.3 Baja

Baja merupakan material yang terbentuk dari paduan dua unsur atau lebih dimana unsur besi merupakan unsur penyusun utama terbesar. Secara umum, komposisi unsur dalam baja akan menentukan sifat baja. Perbedaan ini kemudian dinotifikasi dalam bentuk penamaan tipe baja yang mengacu pada suatu lembaga standarisasi internasional. Adapun kandungan karbon di dalam baja karbon dapat berkisar dari 0.2% hingga sekitar 2.1% berat. Selain unsur C, terdapat unsur lainnya yang biasa ditambahkan seperti Mn, Cr, V, dan W.

Dalam paduan baja, unsur-unsur ini dapat memberikan perubahan sifat dan kualitas baja. Pengaturan kandungan karbon dan unsur tambahan lainnya dapat menghasilkan baja dengan sifat dan kualitas tertentu. Baja karbon rendah dapat memiliki kandungan karbon sebesar 0,05 % berat - 0,30 % berat. Baja karbon sedang (*medium carbon steel*) mengandung unsur karbon kira-kira 0,2 % berat - 0,60 % berat. Baja karbon tinggi (*high carbon steel*) mengandung unsur karbon sekitar 0,60 % berat sampai dengan 1,4 % berat dan memiliki karakter keras dan kuat dengan keuletan rendah.

Penambahan unsur paduan pada baja dapat memperbaiki sifat kekerasan, kekuatan, ketangguhan, daya tahan terhadap gesekan, sifat magnet dan ketahanan terhadap korosi. Unsur paduan yang meningkatkan kekuatan sambungan las adalah Vanadium, Zirkonium, Sesium, Kobalt, Molibden, Aluminium, Nikel, Mangan dan Tungsten. Unsur mangan dapat meningkatkan



kekerasan, ketahanan abrasi dan kekuatan. Silicon dapat menaikkan kekerasan dan elastisitas tetapi menurunkan kekuatan tarik dan keuletannya. Krom dapat meningkatkan ketahanan korosi dengan membentuk lapisan pasivasi berupa oksida yang bersifat protektif pada permukaan baja. Kekuatan tarik dan batas mulur dapat ditingkatkan dengan penambahan unsur vanadium. Karbida yang terbentuk dengan penambahan Vanadium 0,04 – 0,05 % relatif kuat dan stabil. Penambahan yang berlebihan dapat membentuk karbida yang tidak larut sehingga dapat menurunkan kekerasan baja (Fadli, 2011).

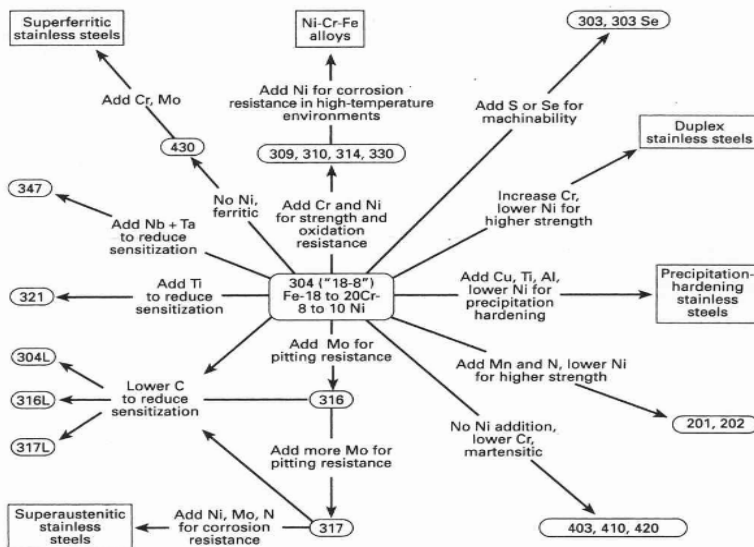
2.4 Baja Tahan Karat

Baja tahan karat merupakan kelompok baja paduan tinggi yang berdasarkan pada sistem Fe-Cr, Fe-Cr-C, dan Fe-Cr-Ni dengan unsur paduan utama minimal 10,5% Krom (Cr) dan Nikel (Ni) dengan sedikit unsur paduan lain seperti Molibdenum (Mo), Tembaga (Cu) dan Mangan (Mn). Kadar kromium tersebut merupakan kadar minimum untuk pembentukan permukaan pasif oksida yang dapat mencegah oksidasi dan korosi. Baja tahan karat dikelompokkan menurut unsur paduan, seperti dijelaskan pada Tabel 2.1 dan Gambar 2.3.

Tabel 2.1. Jenis-Jenis Baja Tahan Karat

Tipe	Grup
2xx	Krom-Nikel-Mangan; tidak bisa dikeraskan; austenitik; non-magnetik
3xx	Krom-Nikel; tidak bisa dikeraskan; austenitik; non-magnetik
4xx	Krom; bisa dikeraskan; martensitik; magnetik
4xx	Krom; tidak bisa dikeraskan; feritik; magnetik
5xx	Krom; renfah krom; tahan terhadap panas

BAB II TINJAUAN PUSTAKA



Gambar 2.3 Klasifikasi Baja Tahan Karat (Beddoes dan Parr, 1999)

1. Baja Tahan Karat Austenitik

Baja tahan karat austenitik adalah baja tahan karat paduan krom-nikel (tipe 3xx) dan krom-nikel-mangan (tipe 2xx). Berjenis austenitik, pada dasarnya bersifat non-magnetik dalam kondisi anil, dan tidak dikeraskan dengan perlakuan panas. Kandungan nikel dan krom nya lebih dari 23%. Baja tahan karat austenitik ini tidak bisa dengan mudah dilakukan *hot-worked* dan dapat dilakukan *cold-worked* dengan pengerjaan yang cepat. *Cold-working* dapat meningkatkan kekuatan mekanik dan baja tahan karat ini akan menjadi sedikit magnetic dibandingkan sebelumnya. Baja tahan karat ini sangat tahan terhadap guncangan (*shock*) dan sulit untuk dilakukan permesinan karena adanya unsur paduan sulfur dan selenium (pada tipe 303 dan 303s). Sifat baja paduan ini memiliki kekuatan pada temperatur



tinggi dan tahan terhadap *scaling*. Ketahanan korosinya dari baja tahan karat austenitic ini biasanya lebih baik jika dibandingkan dengan baja tahan karat feritik ataupun martensitik.

2. Baja Tahan Karat Feritik

Kelompok baja tahan karat feritik mengandung krom sekitar 14% hingga 27% dan masuk dalam tipe 405, 430, dan 446. Memiliki kadar karbon yang rendah, namun kadar krom lebih tinggi dibandingkan jenis baja tahan karat martensitik. Baja ini tidak bisa dikeraskan, dan cukup mengeras dengan perlakuan *cold-working*. Bersifat magnetik, namun dapat meningkatkan sifat *softness*, keuletan, dan ketahanan korosi pada kondisi anil. Pada kondisi anil, kekuatan baja ini sekitar 50 persen lebih tinggi daripada baja karbon dan baja ini lebih baik pada sifat ketahanan korosi dan *machinability* daripada baja tahan karat martensitik. Perlakuan panas yang dapat dilakukan pada baja ini hanya anil, dilakukan untuk *stress-relieving* hasil pengelasan ataupun *cold-working*.

3. Baja Tahan Karat Martensitik

Baja tahan karat ini memiliki kandungan krom sebesar 11,5 – 18%. Beberapa tipe untuk baja ini adalah tipe 403, 410, 416, 420, 440A, 501 dan 502. Bersifat magnetik, dapat dilakukan cold-working dengan mudah terutama dengan kadar karbon yang rendah. Memiliki sifat *machinability* yang sangat baik dan memiliki ketangguhan yang baik, dan memiliki ketahanan korosi yang baik. Ketahanan korosi terbaik dihasilkan dengan pengerasan pada temperatur namun tidak sebaik baja tahan karat austenitik dan feritik. Perlakuan panas pada baja tahan karat martensitik pada dasarnya hamper sama dengan baja paduan rendah, dimana kekuatan maksimum dan kekerasan maksimum dipengaruhi oleh kadar karbon.

4. Baja Tahan Karat Duplex

Baja tahan karat duplex memiliki struktur anil yang biasanya memiliki bagian jumlah austenit dan ferit sama. Jika



dibandingkan dengan baja tahan karat feritik, duplex memiliki sifat ketangguhan yang lebih tinggi, namun ketahanan korosi nya lebih rendah. Sedangkan dengan baja tahan karat austenitik, duplex memiliki ketangguhan yang lebih rendah, namun memiliki kekuatan yang lebih tinggi. Contoh duplex yang sering digunakan adalah tipe 2205 yang memiliki sifat ketahanan korosi yang sangat baik, kekuatan yang baik serta weldability yang baik. Dan duplex tipe ini dapat digunakan sebagai *tube*, *pipe*, *sheet*, dan lain-lain.

5. Presipitasi Hardening

Precipitation hardening merupakan baja tahan karat yang mengalami presipitasi yang memiliki paduan Ni-Cr. Baja ini dapat dikeraskan dengan solution treating dan aging untuk meningkatkan kekerasan dan kekuatannya (Avner, 2004).

2.5 Analisa Kegagalan

Analisa kegagalan adalah kegiatan pemeriksaan/pengujian terhadap suatu komponen yang mengalami kerusakan untuk mencari penyebab terjadi permasalahan yang sifatnya spesifik. Didukung dengan berbagai referensi, pengamatan, dan pengujian laboratorium untuk memperkuat dugaan permasalahan. Kegagalan bisa saja berasal dari manufaktur, perakitan ataupun pengoperasian yang tidak sesuai dengan prosedur, dan tujuan analisa kegagalan untuk mengetahui mekanisme kegagalan. Manfaat yang dihasilkan dari analisa kegagalan dalam jangka pendek adalah perbaikan desain dan proses fabrikasi juga pengoperasian. Untuk jangka panjang bisa dijadikan acuan pengembangan material dan evaluasi untuk memperkirakan kerja suatu material dan memperbaiki sistem perawatan dari material tersebut.

Pengamatan pola patahan yang rusak adalah kunci bagi seluruh proses analisa kegagalan, oleh sebab itu pengamatan secara makroskopis dan mikroskopis harus dilaksanakan secara bertahap. Selain itu pengujian mekanik juga diperlukan karena



secara umum kegagalan disebabkan oleh gaya-gaya yang bekerja dari lingkungan kerja komponen.

2.5.1 Faktor Penyebab Kegagalan

Menurut sumber-sumber penelitian yang ada di dunia industri (Brook & Choudury, 2002), faktor penyebab kegagalan yang sering terjadi di dunia industri dapat dikarenakan:

Faktor Kesalahan Pemilihan Material. Tabel 2.2 dibawah ini menunjukkan statistik tentang permasalahan dalam masalah kegagalan material.

Tabel 2.2 Permasalahan dalam Kegagalan Komponen Mesin
(Brook & Choudury, 2002).

Permasalahan	%
Kesalahan pemiliha material	38
Cacat produksi	15
Kesalahan perlakuan panas	15
Kesalahan desain mekanik	11
Kondisi operasi yang berlebihan	8
Kondisi lingkungan yang tidak terkontrol	6
Pemeriksaan yang kurang baik	5
Material yang tidak jelas	2

Perawatan Komponen yang Kurang Baik. Proses perawatan komponen mesin yang kurang baik termasuk salah satu penyebab kegagalan yang paling dominan. Tabel 2.3 menunjukkan data mengenai kasus kegagalan material yang terjadi.



Tabel 2.3 Kasus Kegagalan Material Akibat Perawatan
Komponen Mesin (Brook & Choudury, 2002).

Permasalahan	%
Perawatan yang kurang baik	44
Cacat saat fabrikasi	17
Defisiensi desain	16
Pemakaian yang abnormal	10
Cacat material	7
Penyebab yang tidak jelas	6

Kesalahan dalam Perancangan Komponen. Faktor kesalahan dalam proses perancangan komponen mesin adalah sebagai berikut:

- Kegagalan ulet akibat pembebanan yang melebihi kekuatan material
- Kegagalan getas akibat beban kejut
- Kegagalan pada temperatur tinggi (pemuluran)
- *Static delayed fracture*
- Proses perancangan yang terlalu banyak memicu konsentrasi tegangan seperti takikan
- Analisa tegangan komponen yang kurang detil yang menyebabkan rawan terjadi kegagalan akibat *overload*
- Kesalahan dalam menentukan material dari komponen mesin sehingga mempengaruhi hitungan yang dilakukan

Kondisi Kerja yang Ekstim. Permasalahan yang spesifik dalam kegagalan komponen mesin akibat kondisi kerja yang ekstrim disajikan dalam Tabel 2.4 berikut ini:



Tabel 2.4 Penyebab Kegagalan dalam Komponen Mesin (Brook & Choudury, 2002)

Permasalahan	%
Korosi	29
Kelelahan	25
Kegagalan getas	16
Kelebihan beban	11
Korosi temperatur tinggi	7
Korosi SCC	6
Pemuluran	3
Abrasi, erosi	3

2.5.2 Prosedur Dalam Analisa Kegagalan

Ketika terjadi sebuah kegagalan atau retak, perlu dilakukan suatu tindakan untuk mencegah terjadinya kegagalan yang sama dengan menginvestigasi dan menganalisa kegagalan komponen yang terjadi. Adapun tindakan yang perlu dilakukan dalam menginvestigasi komponen yaitu (Nishida, 1992):

1. Material yang digunakan
 - a. Data produksi : *melting, rolling, forming, casting, heat treatment*, dan proses *machining*
 - b. Analisa kimia : pengujian X-Ray, komposisi kimia
 - c. Sifat mekanik : *tensile, bending, hardness, impact*, dan *fatigue test*
 - d. Struktur metalurgi : struktur makro dan mikro struktur
 - e. Pengerasan permukaan dan tegangan sisa ; *finishing*
 - f. Patah permukaan
2. Desain tegangan dan kondisi perawatan
 - a. Kekuatan dari luar : golongan, besar, pengulangan.
 - b. Atmospher : udara, air, air laut, dan sebagainya
 - c. Yang lain : kondisi perbaikan

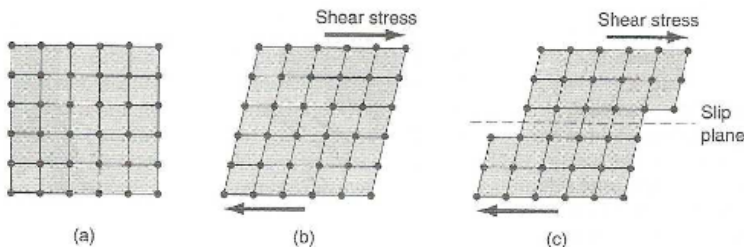
3. Uji percobaan

- a. Uji laboratorium : perhitungan tegangan (kekuatan material, *finite element method* (FEM), kekuatan leleh, kekerasan patahan.
- b. Konfirmasi uji lapangan : ukuran tegangan, uji produksi.

4. Hasil uji seluruhnya

2.6 Deformasi pada Kristal Metalik

Ketika kristal ada dalam tekanan yang makin lama makin besar, respon pertama yang akan terjadi adalah deformasi elastik. Lihat ilustrasinya pada gambar 2.4 (a) dan (b). Kristal akan miring, lalu kembali ke bentuk asal ketika tekanan diiadakan kembali. Jika tekanannya diperbesar sehingga melewati batas tertentu, maka akan terjadi deformasi plastis. Disini, ada sejumlah atom yang berpindah lokasinya. Lihat gambar 2.4 (c). Deformasi yang digambarkan disini disebut slip, yaitu pergerakan relatif dua kelompok atom yang berada di dua sisi berbeda dari satu bidang. Bidang ini disebut bidang slip (slip plane).

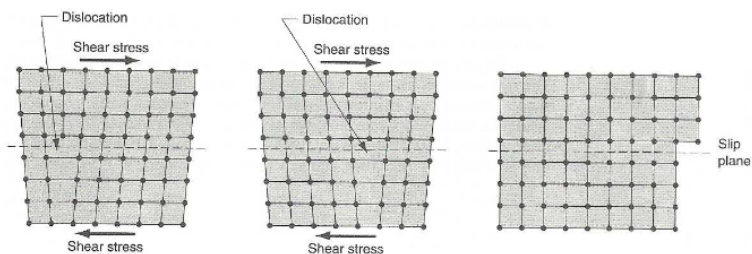


Gambar 2.4 Deformasi pada struktur kristal (a) *original lattice*, (b) deformasi elastis tanpa perubahan permanen pada posisi atom, (c) deformasi plastis mengakibatkan perpindahan posisi atom secara permanen

Deformasi plastis relatif lebih sulit terjadi pada logam yang mempunyai struktur kristal HCP ketimbang pada yang



berstruktur BCC dan FCC. Ini ada hubungannya dengan rendahnya *ductility* pada logam berstruktur HCP, khususnya pada temperatur kamar. Bahan logam yang mempunyai banyak dislokasi ujung, relatif lebih mudah mengalami deformasi. Yang terjadi disini adalah memindahkan posisi cacat dislokasi ujung (lihat gambar 2.5), dimana energi yang diperlukan lebih rendah. Dengan demikian, di satu pihak, cacat dislokasi ujung merupakan hal yang baik, karena membuat bahan logam menjadi lebih ductile, sehingga memudahkan pekerjaan deformasi yang terjadi pada proses manufaktur. Tapi di pihak lain, logam yang mempunyai banyak cacat artinya tidak sekuat logam yang tanpa cacat, dan ini merupakan hal yang buruk dari aspek perancangan produk.



Gambar 2.5 Pengaruh dislokasi terhadap struktur *lattice* akibat tekanan

Di samping deformasi berdasarkan slip plane, ada juga bentuk deformasi yang lain, yaitu twinning. Hasil dari deformasi ini adalah bahwa atom-atom di satu sisi dari bidang twinning (twinning plane), menjadi bayangan cermin dari atom-atom di sisi yang lain. Deformasi ini penting pada struktur kristal HCP (seperti Mg dan Zn) karena disini deformasi slip sulit terjadi.

Satu blok logam bisa dibangun dari jutaan individu kristal, yang disebut butir (grain). Setiap butir mempunyai orientasi latis uniknya sendiri. Secara kolektif, arah latis dari butir-butir tersebut bersifat random. Struktur seperti ini disebut



polikristalin. Ini terjadi karena ketika logam cair menjadi dingin dan mulai menjadi padat, pembentukan inti dari setiap individu kristal terjadi pada posisi dan orientasi yang random, di seluruh cairan tersebut.

Ketika inti-inti kristal ini tumbuh, sehingga kristal-kristal ini bertemu satu sama lain, akan terbentuk batas-butir (grain boundary). Batas ini tebalnya hanya beberapa atom, dan arah orientasinya tidak sama dengan orientasi butir-butir yang dibatasinya. Ukuran butir dalam satu blok logam ditentukan antara lain oleh jumlah inti yang terjadi dan kecepatan pendinginan dari logam cair tersebut. Dalam proses pembuatan logam cor, inti butir sering terjadi karena dinding cetakan yang relatif dingin. Ini juga mempengaruhi arah orientasi butir.

Ukuran butir dipengaruhi secara terbalik oleh laju pendinginan: pendinginan yang cepat akan membuat butir menjadi lebih kecil, sedangkan pendinginan lambat akan berpengaruh sebaliknya. Ukuran butir merupakan hal yang penting dalam logam karena berpengaruh pada sifat mekanikal. Logam yang mempunyai butir-butir yang kecil mempunyai kekuatan dan kekerasan yang lebih tinggi.

Faktor lain yang berpengaruh dalam sifat-sifat mekanikal adalah adanya batas butir pada logam. Batas butir ini perwujudan dari cacat pada struktur kristal, yang menahan Bergeraknya dislokasi. Ini menjelaskan mengapa kecilnya ukuran butir (yang berarti lebih banyak butir dan lebih banyak batas butir), meningkatkan kekuatan logam.

Dengan menahan pergerakan dislokasi, maka batas butir juga memberi kontribusi pada sifat mekanikal dari satu logam, sehingga logam menjadi bertambah kuat setelah mengalami deformasi. Sifat ini disebut strain-hardening, yang akan dijelaskan lebih detil di bagian lain (Surdia, 1992).

2.7 Patah Getas dan Patah Ulet

Patahan adalah spesimen dari sebuah benda menjadi 2 atau lebih potongan karena terjadinya tegangan statik dan pada



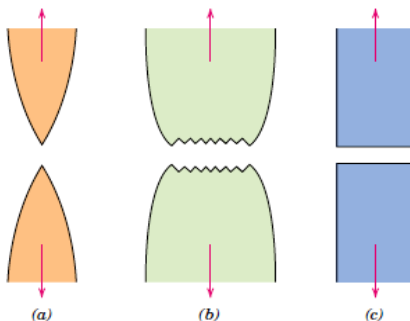
temperature yang relatif rendah terhadap titik leleh dari suatu material. Tegangan yang terjadi pada material bisa merupakan tegangan tarik, tegangan kompresi, tegangan geser ataupun torsi. Dalam rekayasa material terdapat dua jenis mode patahan yang mungkin terjadi yaitu patahan ulet dan patah getas. Klasifikasi jenis patahan ini berdasarkan kemampuan sebuah material dalam menerima deformasi plastis yang dapat menyerap energi yang besar sebelum terjadi patahan. Material yang ulet mempunyai deformasi plastis yang tinggi, pembentukan *small cavity* diujung retak, serta retak memanjang atau menjalar bertahap. Sedangkan pada material yang getas mempunyai deformasi plastis rendah, tegangan lokal meningkat pada ujung retak sehingga retak menjalar dengan sangat cepat.

Patahan ulet dan getas pada suatu material tergantung pada kondisi pembebanan. Pada proses terjadinya patahan melibatkan dua tahap yaitu terbentuknya retak dan perambatan sebagai respon dari tegangan yang dialami oleh material. Modus patahan sangat bergantung pada perambatan retak.

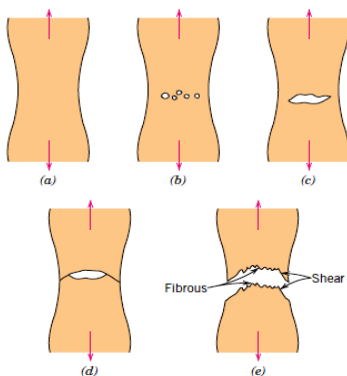
2.7.1 Patahan Ulet

Bentuk patahan ulet memiliki karakteristik yang berbeda jika diamati secara makroskopis. Pada gambar 2.6 ditunjukkan skematik representative dari dua karakteristik profil patahan secara makro. Konfigurasi yang ditunjukkan oleh Gambar 2.6 (a) ditemukan pada material lunak seperti emas pada temperature ruang dan metal, polimer dan inorganik gelas pada temperature yang relatif tinggi.

Secara umum profil patahan material ulet akibat tegangan tarik ditunjukkan pada Gambar 2.6 (b) dimana patahan didahului oleh adanya *necking*. Proses patahan ulet dari material terjadi dalam beberapa tahap. Pertama, setelah terjadi pengecilan luasan setempat (*necking*) *cavities* kecil atau *microvoid* terbentuk di dalam struktur material seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 2.7.



Gambar 2.6 Bentuk Patahan (a) ulet, (b) ulet setelah terjadi *necking*, (c) getas tanpa terjadi deformasi plastis (Callister, 2007)



Gambar 2.7 Tahap patahan cup and cone (a) awal *necking*, (b) terbentuknya cavity kecil, (c) pengumpulan *cavity* hingga menjadi retakan, (d) perambatan retak, (e) patahan geser dengan sudut 45° terhadap arah tegangan (Callister, 2007)

Kemudian dengan bertambahnya deformasi akibat tegangan maka *microvoid* membesar dan berkumpul menjadi satu



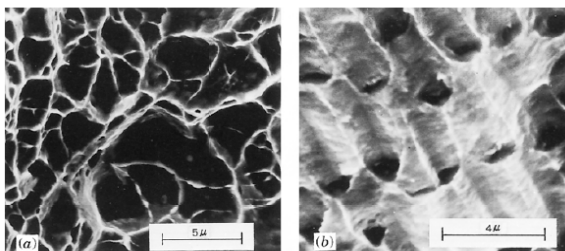
yang kemudian *coalesce* membentuk retak secara elips yang memiliki panjang tegak lurus dari arah pembebanan. Retak kemudian tumbuh sejajar dengan arah pembebanan, akhirnya patahan terbentuk oleh perambatan retak yang cepat disekitar area *necking* seperti gambar 2.7 (e) oleh deformasi geser pada sudut disekitar arah tegangan tarik dimana sudut ini merupakan tegangan geser tertinggi

Terkadang sebuah patahan mempunyai karakteristik kontur seperti *cup* dan *cone* karena salah satu permukaan patahan menyerupai *cone*. Spesimen yang mempunyai bentuk patahan seperti ini berbentuk fibrous yang tidak teratur dimana hal ini menandakan deformasi plastis. Lebih jauh lagi untuk mengetahui informasi mengenai penentuan secara pengujian dengan menggunakan *Scanning Electron Microscope* (SEM). Studi mengenai tipe patahan disebut *fractographic*. *Scanning Electron Microscope* (SEM) lebih banyak digunakan dalam mengamati bentuk crack, patahan karena mempunyai resolusi dan kedalaman observasi yang lebih tinggi dari mikroskopik optik. Gambar 2.8 menunjukkan patah ulet *cup* dan *cone* dan perbedaan patah getas pada *mild steel*.



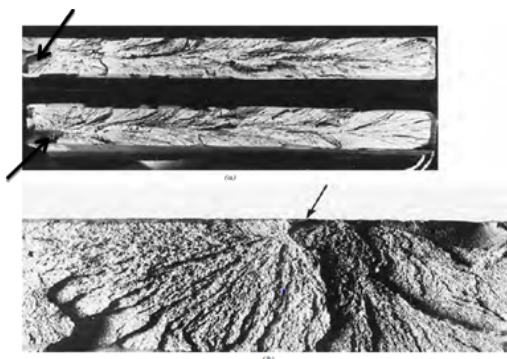
Gambar 2.8 Penampakan (a) patah ulet (*cup and cone*) pada aluminium, dan (b) patah getas pada *mild steel* (Callister, 2007)

Pada skala makro, patah ulet ditunjukkan dengan adanya perubahan ketinggian yang nyata sepanjang penampang potongan melintang dari benda, biasa dikenal dengan istilah *shear lips*. Kemudian pada skala mikro, patah ulet ditandai dengan adanya profil *dimple* pada permukaan patahnya yang disebabkan oleh penjaralan retakan mikro (*microvoids coalescence*) pada Gambar 2.9.



Gambar 2.9 Hasil SEM (a) *spherical dimple* karakteristik, patahan hasil beban tarik *unixial*, 3300×, dan (b) *spherical dimple* karakteristik hasil beban geser, 5000x (Callister, 2007)

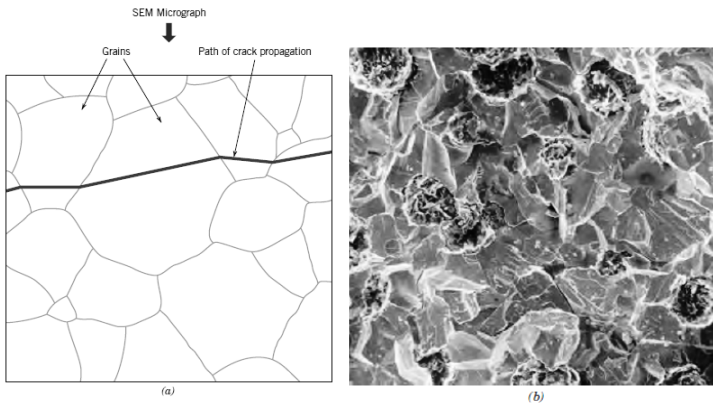
2.7.2 Patahan Getas



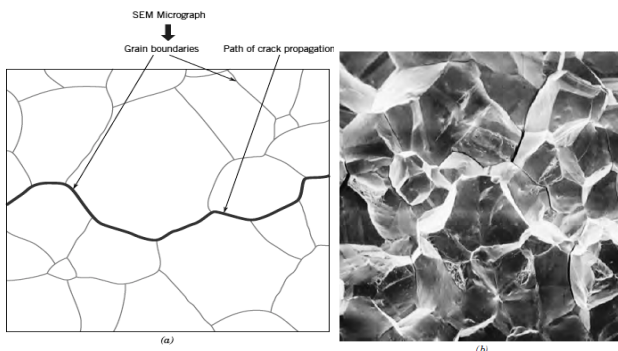
Gambar 2.10 Penampakan foto (a) bentuk V “chevron” sebagai karateristik patah getas dan (b) permukaan patah getas daerah asal retakan (Callister, 2007)



Patah getas sering terjadi tanpa adanya atau sedikit sekali terjadi deformasi plastis pada material. Retak/ patahan merambat sepanjang bidang-bidang kristalin yang membelah atom-atom material (*transgranular*). Kemudian pada material lunak dengan butir kasar (*coarse grain*) maka dapat dilihat pola-pola yang dinamakan *chevron* seperti Gambar 2.10 (a) atau patah getas permukaan terlihat garis atau daerah asal retakan disebut *fan pattern* seperti pada Gambar 2.10 (b). Untuk hasil perambatan dan SEM, dapat terlihat jelas untuk retak yang melewati batas butir (*transgranular*) dan retak yang terjadi sepanjang batas butir (*intergranular*) pada Gambar 2.11 dan 2.12.



Gambar 2.11 (a) skema perambatan retak yang melewati butir (*transgranular*) (b) hasil SEM dari patah secara transgranular (Callister, 2007)

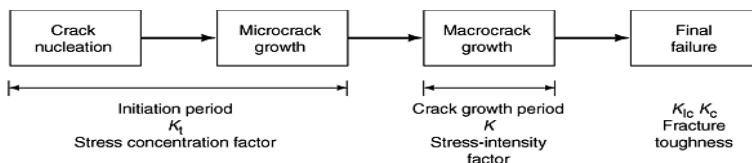


Gambar 2.12 (a) skema perambatan retak yang terjadi sepanjang batas butir (*intergranular*) (b) hasil SEM dari patah secara *intergranular* (Callister, 2007)

2.8 Mekanisme Pembentukan Patah Lelah

Kelelahan mengakibatkan terjadinya patah lelah. Patah lelah terjadi melalui tiga tahap yaitu tahap retak awal (*crack initiation*), tahap penjaralan retak (*crack propagation*), dan tahap patah statis. Dan setelah retak lelah merambat cukup jauh, maka beban yang bekerja hanya akan didukung oleh penampang tersisa yang belum retak dan akhirnya komponen akan patah (tahap *final failure*).

Menurut Schijve, terdapat 5 fase yang selama proses *fatigue* yaitu *Cyclic slip*, *Crack nucleation*, *Growth of microcrack*, *Growth of macrocrack*, *Final failure* (ASM Handbook Committee Volume 19, 2002).

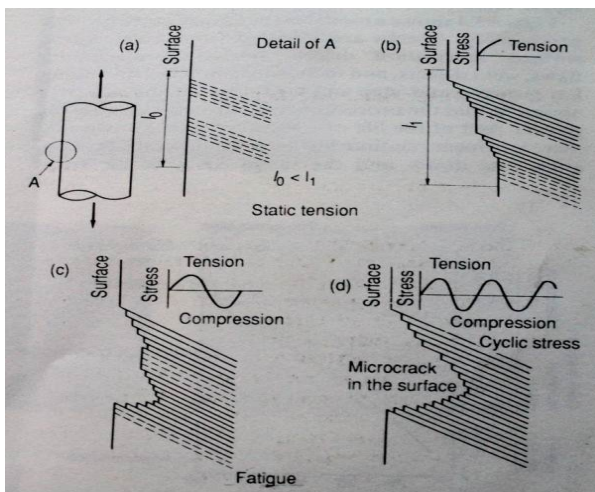


Gambar 2.13 Mekanisme patah lelah dan faktornya (ASM Handbook Vol.19 *Fatigue and Fracture*, 2002)



2.8.1 Tahap Retak Awal (*Crack Initiation*)

Awal retak biasanya dimulai dari permukaan. Hal ini terjadi karena permukaan menerima beban terbesar dan paling memungkinkan terjadinya konsentrasi tegangan yang disebabkan oleh adanya perubahan dimensi pada permukaan atau proses pengerjaan tertentu pada material. Adanya cacat dalam menyebabkan juga konsentrasi tegangan. Fenomena awal retak secara sederhana diberikan oleh Wood. Beberapa model diberikan dalam menjelaskan *fatigue crack* pada gambar 2.14.



Gambar 2.14 Model Wood untuk pengintian retak (Nishida, 1992)

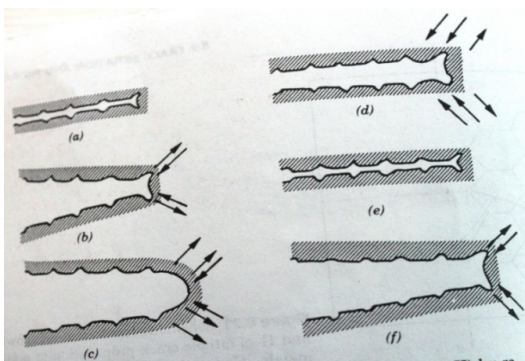
Pada beban tarik pertama, slip terjadi dengan membentuk permukaan bertingkat yang membentuk sudut 45° dengan sumbu tegangan. Hal ini akibat tegangan geser maksimal yang terjadi pada sudut tersebut. Pembebanan selanjutnya menyebabkan slip pada arah yang berlawanan. Slip ini terjadi pada bidang yang berdekatan dengan yang pertama. Dan selanjutnya merupakan

proses pengulangan dalam pembebanan siklus yang sama. Tahap retak awal ini meliputi fase *cyclic slip*, fase pembentukan inti retak (*crack nucleation*) dan pertumbuhan retak mikro (*growth of microcrack*).

2.8.2 Tahap Perambatan Retak (*Crack Propagation*)

Perambatan retak pada suatu komponen terjadi jika tegangan maksimum pada ujung retakan berada di atas kekuatan material. Hal ini mengakibatkan peningkatan konsentrasi tegangan pada ujung retak. Awal retakan mula-mula menjalar pada bidang slip di dalam beberapa butir dengan kecepatan yang sangat lambat. Pengamatan secara makro tidak menampakkan perambatan ini. Peristiwa ini disebut perambatan retak tahap I.

Selanjutnya pertumbuhan retak pada tahap II ditandai dengan adanya striasi. Pada tahap ini pertumbuhan retak tegak lurus dengan tegangan tarik maksimum. Retakan mulai kelihatan dengan mata telanjang, oleh karena itu disebut dengan retak makro. Pengamatan retak pada penelitian biasanya difokuskan pada tahap ini. Adapun model mekanisme crack secara plastis terdapat pada Gambar 2.15 dibawah ini.



Gambar 2.15 Mekanisme penumpulan ujung retakan secara plastis (a) beban nol (b) beban tarik kecil (c) beban tarik maksimum (d) beban tekan maksimum (e) beban nol (f) beban tarik kecil (Callister, 2007)



2.9 Karakteristik Patahan

Klasifikasi dasar dari proses patah bila ditinjau dari modus dan penyebabnya adalah patah ulet, patah getas, patah lelah (*fatigue*), dan patah merangkak (*creep/monotonic*). Masing-masing dari jenis patahan diatas memiliki karakteristik tersendiri. Berikut adalah karakteristik dasar untuk membedakan jenis patah lelah dengan patah merangkak, jenis patah getas dengan patah ulet pada skala makro, dan jenis patah getas dengan patah ulet pada skala mikro (ASM Handbook Committee Volume 12, 2002):

A. Perbedaan karakteristik antara patah lelah dengan patah merangkak

Beachmarks dan striasi mengindikasikan patah lelah, sedangkan pada patah merangkak parameter tersebut tidak terlihat. Pertanda kehadiran beach marks bisa diketahui melalui pengamatan makro menggunakan *stereomicroscope*, dan striasi hanya bisa diamati pada saat dilaksanakan *SEM fractography*. Profil *beachmarks* dan striasi ini merupakan hasil dari fluktuasi beban yang diberikan pada benda.

B. Perbedaan karakteristik antara patah getas dengan patah ulet pada skala makro

Pada skala makro, patah ulet ditunjukkan dengan adanya perubahan ketinggian yang nyata sepanjang penampang potongan melintang dari benda, biasa dikenal dengan istilah *shear lips*. Kemudian pola patah getas ditunjukkan dengan permukaan patahan yang datar dan tegak lurus terhadap arah beban, serta tanpa adanya petunjuk bahwa telah terjadi deformasi plastis sebelum benda mengalami patah. Selain kedua karakteristik diatas, terdapat pola patahan gabungan (*mix-mode appearance*) baik patah getas yang bertransformasi jadi ulet ataupun patah ulet yang bertransformasi menjadi getas. Kebanyakan kasus yang terjadi adalah patah getas bertransformasi menjadi patah ulet.



C. Perbedaan karakteristik antara patah getas dengan patah ulet pada skala mikro

Pada skala mikro, patah ulet ditandai dengan adanya profil *dimple* pada permukaan patahnya yang disebabkan oleh penjaran retakan mikro (*micro voids coalescence*). Sedangkan patah getas ditandai dengan fenomena patahan melintasi butiran atau patah transgranular, dikenal dengan nama *cleavage* atau fenomena patahan melewati butir atau intergranular, dikenal dengan nama *intergranular embrittlement*.



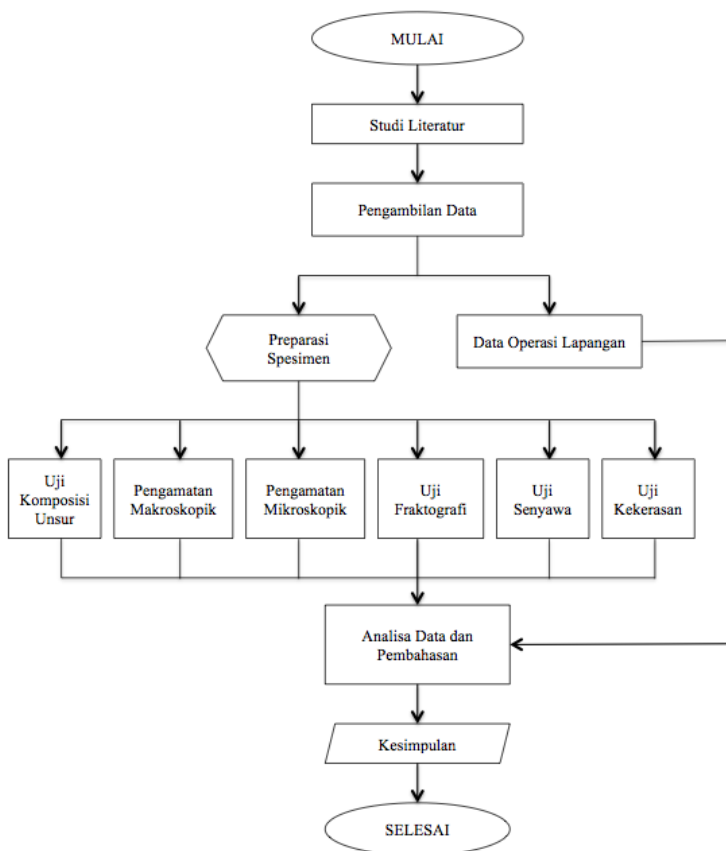
(Halaman ini sengaja dikosongkan)



BAB III

METODOLOGI

3.1. Diagram Alir



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian



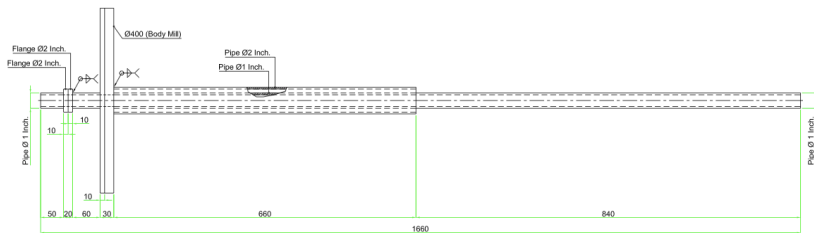
3.2 Metode Penelitian

Metode Penelitian yang digunakan dalam penelitian kali ini antara lain studi literatur, studi lapangan, dan pengujian di laboratorium. Adapun hal-hal yang mencakup penelitian antara lain:

1. Studi Literatur
Metode studi literatur mengacu pada buku-buku, jurnal-jurnal penelitian, dan situs industri yang mempelajari tentang *water injection*.
2. Studi Lapangan
Metode ini mengacu pada pencarian informasi tentang komponen yang akan diteliti beserta informasi tentang kegagalan yang terjadi pada komponen tersebut dengan cara terjun langsung ke lapangan yaitu PT. Holcim Tuban Plant Indonesia, serta berdiskusi dengan dosen mata kuliah, dosen pembimbing, dan pihak PT. Holcim Tuban Plant Indonesia yang ahli dibidangnya.
3. Pengujian
Metode ini dilakukan dengan pengujian langsung di laboratorium sesuai dengan prosedur dan metode yang ada. Adapun pengujian yang diperlukan dalam penelitian ini yaitu: pengujian mikroskopik dengan mikroskop optik, pengujian fraktografi dengan SEM, uji komposisi dengan menggunakan OES, pengujian kekerasan dengan metode *brinell hardness test*, dan pengujian senyawa yang terbentuk pada material *water injection* dengan XRD.

3.3 Material

Pada bulan Agustus 2016 ditemukan *water injection* pada *finish mill* di PT. Holcim Tuban Plant mengalami kegagalan yang diperlihatkan pada Gambar 3.2. Spesifikasi material tersebut adalah Stainless Steel. 1" SCH 40S X 6M. WLD ASTM A312.



Gambar 3.2 Komponen *water injection*



Gambar 3.3 Komponen *water injection* yang mengalami kegagalan



Gambar 3.4 Permukaan *water injection* yang mengalami kegagalan

3.4 Peralatan

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini antara lain:

1. Penggaris
2. Alat Pemotong
3. Amplas Grade 80 - 2000



4. Mesin Polish
5. Larutan Etsa
6. Alumina
7. Resin
8. Kamera Digital
9. Mesin Mikroskop Stereo
10. Mesin Mikroskop Optik
11. Mesin Pengujian Kekerasan
12. Mesin SEM
13. Mesin OES
14. Mesin XRD

3.5 Tahapan Penelitian

3.5.1 Review Dokumen Perusahaan

Review dokumen perusahaan dilakukan untuk mendapatkan data data perusahaan yang berkaitan dengan *water injection* sebagai pendukung hasil penelitian, berikut data yang harus diambil, yaitu :

1. Desain *water injection*
2. Data operasi
3. Spesifikasi material
4. *Maintenance record*

3.5.2 Preparasi Spesimen

Tahap Persiapan ini diperlukan sebelum melakukan pengujian untuk menentukan penyebab kegagalan *water injection* pada PT. Holcim Tuban Plant Indonesia. Persiapan ini berupa proses *cutting* dan *sectioning*. Dimana spesimen yang digunakan adalah spesimen dengan bagian yang mengalami kegagalan serta bagian yang jauh dari kegagalan.

3.5.3 Uji Komposisi Unsur

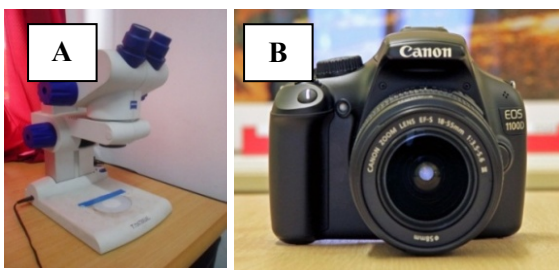
Pengujian komposisi unsur adalah untuk mengetahui komposisi unsur yang terdapat pada komponen yang mengalami kegagalan. Pada identifikasi komposisi kimia menggunakan alat *Optical Emission Spectroscopy (OES)* untuk mengetahui komposisi yang ada pada *water injection*.

3.5.4 Pengamatan Makroskopik

Pengamatan makro dilakukan untuk mengetahui bentuk, tampilan dan lokasi komponen yang mengalami kegagalan secara makro. Pengamatan makro dilakukan menggunakan kamera dan digital dan mikroskop stereo.

Adapun perlakuan terhadap sampel material sebagai berikut:

1. Melakukan pengambilan fotografi dengan kamera digital untuk mendapatkan informasi bentuk dari kegagalan secara makro.
2. Pengamatan melalui *stereomicroscope* terhadap sampel material dengan beberapa kali perbesaran untuk mendapatkan profil makronya.



Gambar 3.5 (a) Kamera merk Canon tipe SLR (b) Stereomicroscope

3.5.5 Pengamatan Mikroskopik

Pada pengamatan mikroskopik dengan mikroskop optik dilakukan untuk menganalisa fasa, bentuk, dan ukuran



strukturmikro. Hal ini digunakan untuk mengetahui proses manufaktur yang terjadi pada material tersebut. Pengujian ini dilakukan dengan menggunakan mikroskop optik Olympus BX51M-RF. Pada pengujian metallografi dibagi menjadi dua tahap, yaitu :

1. Tahap persiapan

- *Mounting* : Membuat cetakan pada spesimen dengan resin agar proses penggosokan menjadi lebih mudah
- *Grinding* : Menggosok spesimen dengan kertas gosok grade 80 – 2000 dan dialiri dengan air. Spesimen diputar 90° atau tegak lurus terhadap arah gosokan ketika pindah grade.
- *Polishing* : Memoles spesimen dengan pasta alumina di atas piringan yang berputar cepat. Proses ini akan menghasilkan permukaan yang mengkilat seperti cermin.
- *Etching* : Mencelup permukaan spesimen ke dalam larutan etsa nital
- *Observasi* : Proses pengamatan struktur mikro secara langsung menggunakan mikroskop optik.

2. Tahap pengamatan

Tahap pengamatan dilakukan untuk mengamati struktur mikro spesimen dengan mikroskop optik dengan beberapa kali perbesaran.

Analisa ukuran butir dilakukan menggunakan metode perhitungan Jeffries dengan formula dibawah ini:

$$N_A = f \left(N_{\text{inside}} + \frac{N_{\text{intercept}}}{2} \right) \dots\dots\dots (3.1)$$

$$A \text{ (mm}^2\text{)} = \frac{1}{N_A} \dots\dots\dots (3.2)$$



$$d \text{ (mm)} = \frac{1}{\sqrt{N_A}} \dots\dots\dots (3.3)$$

Dimana:

N_A = Grains/Unit Area

A = Average Grain Area (mm^2)

d = Average Grain Diameter (mm)



Gambar 3.6 Mikroskop Optik Olympus BX51M-RF

3.5.6 Uji Fraktografi

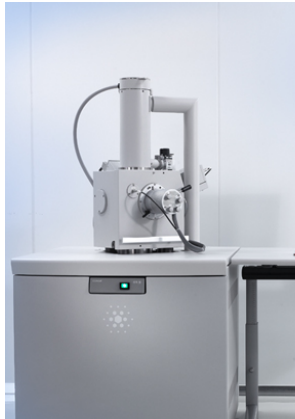
Pada uji fraktografi dilakukan dengan menggunakan alat, yaitu *Scanning Electron Microscope* (SEM). SEM adalah sebuah mikroskop elektron yang didesain untuk menganalisa permukaan dari objek solid secara langsung.

Langkah-langkah yang dilakukan dalam *fractography* menggunakan SEM adalah sebagai berikut :

1. Spesimen yang telah dipotong dibersihkan dengan hati-hati untuk menghilangkan debu dan pengotor ringan lainnya.
2. Spesimen diletakkan diatas holder yang sebelumnya telah dilekatkan dengan *carbon tape*. *Carbon tape* berfungsi untuk melekatkan *holder* dengan sampel



3. Spesimen yang telah berisi *holder* dimasukkan kedalam mesin SEM pada Gambar 3.7 dan siap dilakukan proses pengamatan. Pada layar komputer akan tampak permukaan spesimen dengan berbagai perbesaran yang bisa diatur sesuai keinginan.



Gambar 3.7 Mesin SEM –EDAX FEI type Inspect S-50

3.5.7 Uji Senyawa

Uji senyawa dengan sistem karakterisasi oleh difraksi Sinar-X (XRD) yang dilakukan menggunakan alat *Pan Analytical XRD* di Laboratorium Karakterisasi Teknik Material dan Metalurgi. Karakterisasi ini dilakukan untuk melihat struktur kristal dan fase-fase yang terbentuk. Tujuan dilakukannya pengujian analisis struktur kristal adalah untuk mengetahui perubahan fase struktur bahan dan mengetahui fase-fase apa saja yang terbentuk selama proses pembuatan sampel uji.

Tahap pertama yang dilakukan dalam analisa sinar-X adalah melakukan analisa pemeriksaan terhadap sampel yang belum diketahui strukturnya. Sampel ditempatkan pada titik fokus hamburan sinar-X yaitu tepat di tengah-tengah *plate* yang digunakan sebagai tempat yaitu sebuah plat tipis yang berlubang



di tengah berukuran sesuai dengan sampel (pelet) dengan perekat pada sisi baliknya.

Spesimen dengan daerah yang mengalami patahan dibandingkan dengan spesimen yang letaknya jauh dari patahan, kemudian dianalisa menggunakan XRD dengan mesin PANalytical seperti yang terlihat pada Gambar 3.8. Data dan grafik hasil pengujian XRD selanjutnya dicocokkan dengan JCPDS (*Joint Committee of Powder Diffraction Standard*) untuk mengetahui struktur kristal yang sesuai.

Hasil uji senyawa ini juga dapat digunakan untuk menghitung nilai *microstrain broadening* pada setiap peak yang muncul berdasarkan formula di bawah ini:

$$B = 4\varepsilon \frac{\sin \theta}{\cos \theta} \dots\dots\dots (3.4)$$

Dimana:

- B : Lebar setengah puncak / FWHM (rad)
- ε : *Microstrain Broadening*
- θ : Posisi sudut terbentuknya puncak



Gambar 3.8 Mesin XRD PANanalytical



3.5.8 Uji Kekerasan

Pengujian kekerasan dilakukan untuk mengetahui distribusi nilai kekerasan pada spesimen dengan menggunakan metode brinell. Berikut prosedur penggunaan mesin kekerasan:

1. Permukaan spesimen dibersihkan
2. Memasang indenter bola baja
3. Menempatkan pemegang dan beban pada mesin
4. Menaikkan meja spesimen dengan memutar *wheel* sehingga indenter melakukan penetrasi pada spesimen hingga jarum penunjuk kecil berada sejajar dengan jarum penunjuk utama.
5. Merilis beban sehingga kondisi pembebanan mayor hingga beberapa saat.
6. Pada saat pembebanan sudah berhenti, angka yang tertera pada mesin terbaca dengan besaran *brinell hardness number* (BHN).

3.5.9 Perhitungan Ketebalan Dinding Pipa Terhadap Tekanan Internal

ASME B31.3 menyertakan perhitungan nilai ketebalan dinding pipa nominal yang mampu digunakan dibawah tekanan internal dengan besar tertentu berdasarkan persamaan 3.7.

$$t = \frac{PD}{2(SE+PY)} \dots\dots\dots (3.5)$$

$$t_m = t + CA \dots\dots\dots (3.6)$$

$$t_{nom} = \frac{t_m}{0.875} \dots\dots\dots (3.7)$$

- P** = *Design Pressure* (Psig)
D = *Pipe Outside Diameter* (in)
S = *Allowable Stress in Tension* (Psi)
E = *Longitudinal-joint Quality Factor*
Y = *Wall Thickness Correction Factor*

BAB III METODOLOGI



CA = Corrosion Allowance

t = Pressure Design Thickness (in)

t_m = Minimum Required Thickness (in)

t_{nom} = Nominal Thickness (in)

3.6 Rancangan Penelitian

Tabel 3.1. Rancangan penelitian

Bahan	OES	Mikroskop Stereo	Mikroskop Optik	SEM	Brinell Test	XRD
Bagian gagal	-	√	√	√	-	√
Bagian bukan gagal	√	-	√	√	√	√



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

4.1 Analisis Data

4.1.1 *Record Water Injection di Vertical Roller Mill*

Pada bulan Agustus 2016 PT. Holcim Tuban Plant Indonesia sedang melaksanakan *maintenance* rutin. Kemudian di *Finish Mill 2* ditemukan sebuah kegagalan dari *water injection* yang merupakan komponen *vertical roller mill*. Padahal *water injection* tersebut baru beroperasi beberapa minggu. *Water injection* ini menggunakan material *stainless steel* 1" SCH 40S X 6M. WLD ASTM A312. Tabel 4.1 dan 4.2 menunjukkan data-data *water injection* dan *vertical roller mill*.

Tabel 4.1 Dimensi dan Operasi *Water Injection*
PT. Holcim Tuban Plant Indonesia

Tebal Pipa	3.38 mm
Panjang Pipa	1660 mm
Massa Pipa	4.88 kg
Kecepatan Fluida	5 m ³ /jam
Tekanan Fluida	3 bar
Temperatur Fluida	25°C

Tabel 4.2 Data Operasi *Vertical Roller Mill* di *Finish Mill* PT.
Holcim Tuban Plant Indonesia

Daya	5200 kW
<i>Table Speed</i>	22.3 radian/menit
<i>Table Diameter</i>	5.6 m
Kapasitas	260 ton/jam



4.1.2 Uji Komposisi Unsur

Pengujian ini dilakukan untuk mengamati komposisi unsur pada spesimen *water injection* dengan menggunakan OES (*Optical Emission Spectroscopy*). Tabel 4.3 menunjukkan hasil pengujian yang dibandingkan dengan salah satu komposisi unsur *stainless steel* yaitu SS 301L.

Tabel 4.3 Perbandingan Hasil Uji Komposisi Unsur Komponen
Water Injection dengan SS 301L

Unsur (%)	Spesimen <i>Water Injection</i>	SS 301L
Si	0.61	1.00
Mn	2.03	2.00
P	0.06	0.045
S	0.01	0.03
Ni	7.65	5.00-8.00
Cr	13.39	16.0-18.0
Mo	0.22	-
C	0.03	0.03
Fe	Balance	Balance

Berdasarkan Tabel 4.3, komposisi unsur spesimen *water injection* memiliki kesesuaian dengan SS 301L (ASTM A959), hanya saja kadar kromium pada spesimen lebih kecil dibandingkan SS 301L. Ini membuktikan bahwa *stainless steel* digunakan sebagai material *water injection* pada PT. Holcim Tuban Plant Indonesia. *Water injection* yang diteliti tidak memiliki *certificate* sehingga tidak bisa dibandingkan standar komposisi unsur materialnya.

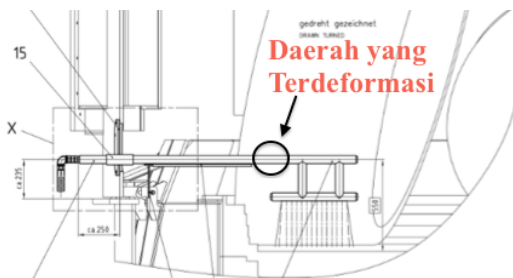
4.1.3 Pengamatan Makroskopik

Gambar 4.1 menunjukkan posisi kegagalan yang terjadi pada *water injection* di dalam *vertical roller mill*. Gambar 4.2 menunjukkan hasil visual dari permukaan *water injection* yang mengalami kegagalan. Terlihat kegagalan *water injection* berupa

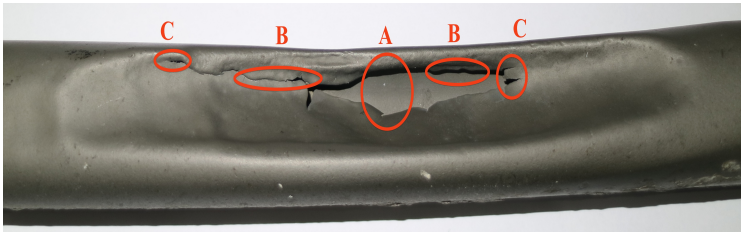
BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

deformasi atau perubahan bentuk dan ukuran serta terjadinya patahan. Perubahan bentuk dan ukuran *water injection* ditunjukkan dengan pipa *water injection* yang bengkok dan menjorok kedalam serta adanya penipisan di daerah kegagalan seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.4. Ketebalan pipa pada awalnya sebesar 3.38 mm kemudian setelah mengalami penipisan menjadi 0.18 mm.

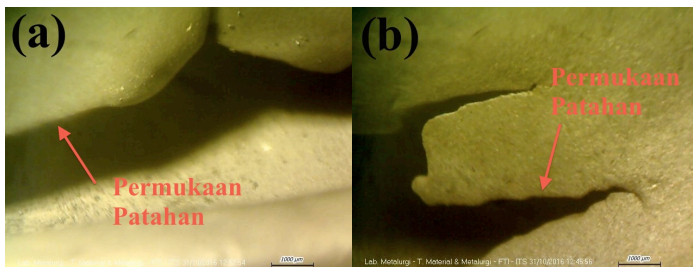
Menurut Callister (2007), pola permukaan patahan dibedakan menjadi 3 bagian yang menunjukkan tahapan perpatahan. *Initial Crack* merupakan awal mula terjadinya patahan dengan ditunjukkan pola permukaan patahan yang halus. *Crack propagation* merupakan daerah yang menunjukkan penjarangan retak yang terjadi. Dan *final crack* merupakan daerah yang menunjukkan akhir dari retak dengan bentuk permukaan yang kasar. Pada *water injection* yang mengalami kegagalan ditemukan 3 pola permukaan patahan. Daerah A menunjukkan ciri retak awal (*initial crack*), daerah B menunjukkan ciri penjarangan retak (*crack propagation*), dan retak akhir (*final crack*) ditunjukkan pada daerah C. Gambar 4.3 menunjukkan pola permukaan patahan pada daerah *initial crack* dan *final crack*. Namun secara visual ditemukan perbedaan pola patahan pada dua daerah C. Hal ini dapat menunjukkan arah penjarangan setelah terjadinya patahan pertama.



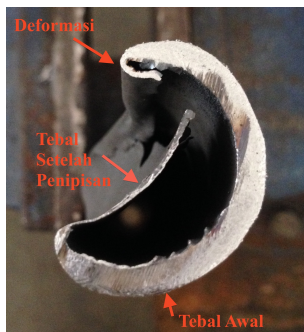
Gambar 4.1 Daerah *water injection* yang mengalami kegagalan



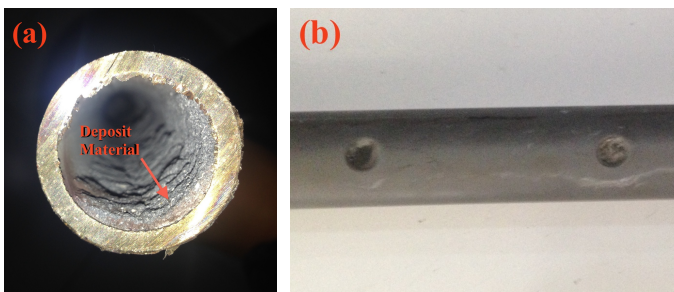
Gambar 4.2 Pengamatan makroskopik permukaan spesimen *water injection*



Gambar 4.3 Pengamatan pola permukaan patahan pada daerah (a) *initial crack* dan (b) *final crack*



Gambar 4.4 Deformasi dan penipisan pada spesimen *water injection*



Gambar 4.5 Deposit material pada bagian dalam pipa (a) sekitar lubang, dan (b) tepat di lubang *water injection*

Selain itu, pada bagian dalam pipa sekitar lubang dan tepat di lubang *water injection* juga ditemukan deposit material tertentu yang telah mengeras. Gambar 4.5 menunjukkan fenomena deposit material tersebut.

4.1.4 Pengamatan Mikroskopik

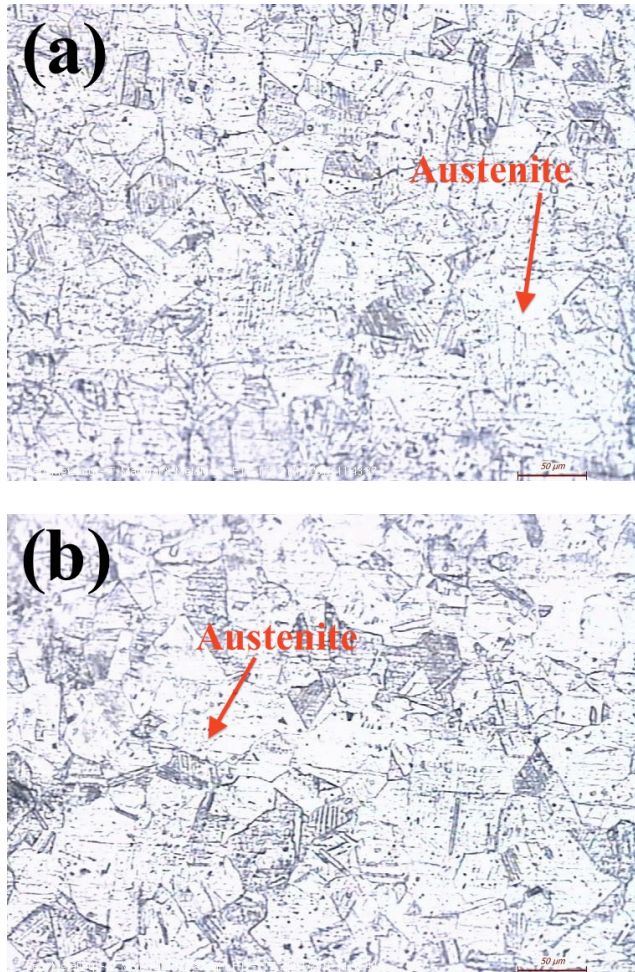
Pengamatan ini dilakukan menggunakan mikroskop optik pada daerah pipa *water injection* yang mengalami patahan dan tidak mengalami patahan. Sehingga dapat diamati apakah material mengalami perubahan struktur mikro yang menyebabkan berubahnya sifat dari material tersebut dan memicu terjadinya patahan. Pengamatan yang dilakukan dengan perbesaran 200 kali ditunjukkan oleh Gambar 4.6.

Berdasarkan hasil pengamatan mikroskopik pada gambar 4.6, didapatkan bahwa pada bagian terang adalah fasa austenite yang merupakan fasa utama material ini. Dapat diketahui pula tidak ada perubahan morfologi butir diantara kedua daerah tersebut.

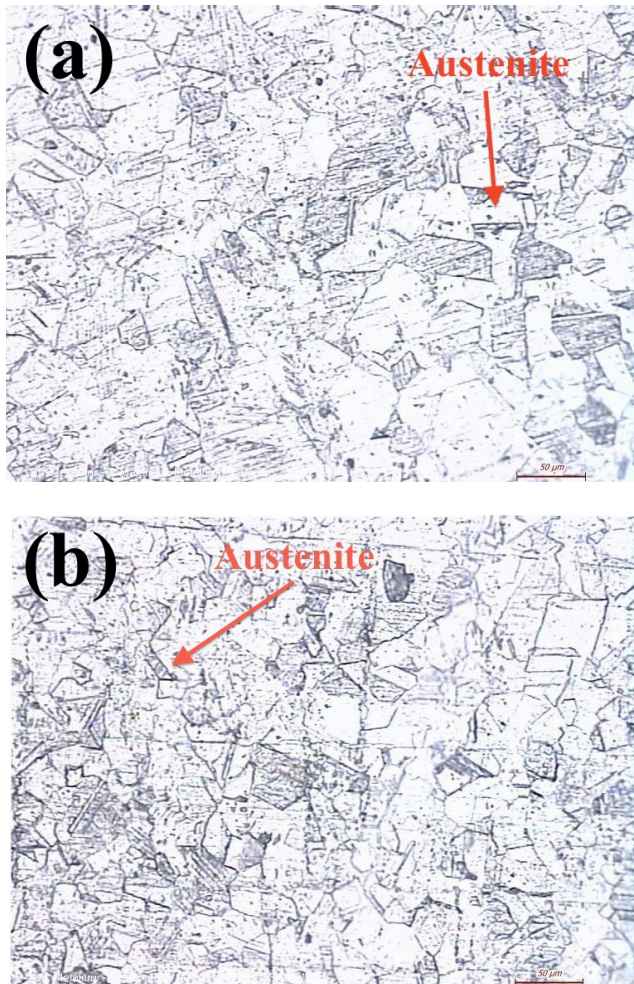
Gambar 4.7 memperlihatkan daerah *cross section* yang mengalami deformasi dan tidak mengalami deformasi. Keduanya memperlihatkan perbedaan morfologi butir pada perbesaran yang sama yaitu 200 kali. Daerah yang tidak mengalami deformasi memiliki butir dengan ukuran lebih besar dibandingkan dengan



daerah yang mengalami deformasi. Menggunakan metode Jeffries didapatkan luas butir daerah yang tidak terdeformasi sebesar $1.479 \mu\text{m}^2$ dan butir pada daerah terdeformasi sebesar $1.35 \mu\text{m}^2$.



Gambar 4.6 Pengamatan mikroskopik pada permukaan daerah (a) tidak mengalami patahan, dan (b) mengalami patahan

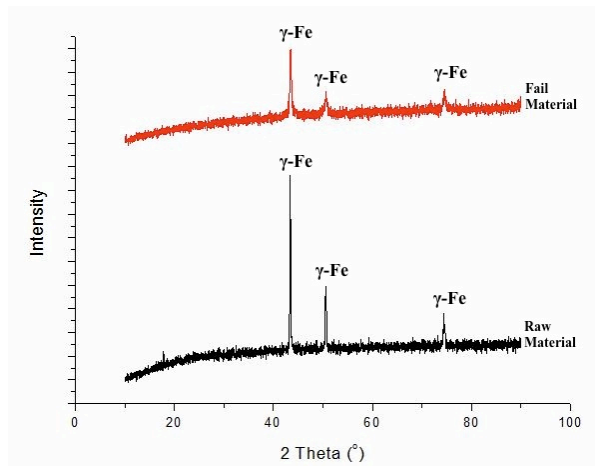


Gambar 4.7 Pengamatan mikroskopik pada *cross section* daerah (a) tidak mengalami deformasi, dan (b) mengalami deformasi



4.1.5 Uji Senyawa

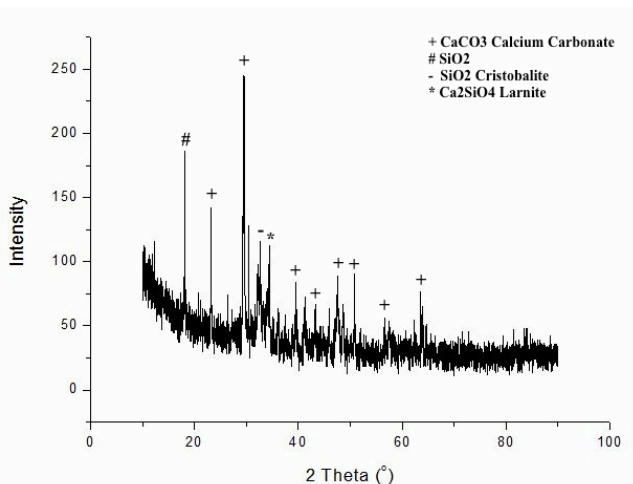
Uji senyawa dilakukan untuk mengetahui senyawa apa saja yang terkandung pada sampel yang diujikan menggunakan XRD (*X-Ray Diffraction*). Pada penelitian kali ini, sampel yang diujikan adalah deposit material yang terdapat pada bagian dalam pipa *water injection*, permukaan dalam pipa *raw material water injection* dan permukaan dalam pipa *water injection* yang mengalami patah.



Gambar 4.8 Hasil XRD permukaan dalam pipa *raw material water injection* dan daerah yang mengalami kegagalan

Gambar 4.8 menunjukkan hasil XRD pada permukaan dalam pipa *water injection* yang mengalami kegagalan dan permukaan *raw material water injection*. Hasil XRD permukaan dalam pipa *raw material water injection* didapatkan fasa dominan yaitu γ -Fe. Kartu JCPDS yang digunakan yaitu 96-901-4712 (besi gamma). Dan hasil XRD pada permukaan dalam pipa *water injection* yang mengalami kegagalan didapatkan fasa dominan yaitu γ -Fe. Kartu JCPDS yang digunakan yaitu 96-901-4712 (besi

gamma). Kedua grafik yang dihasilkan tidak menunjukkan perbedaan dari 2θ untuk tiap *peak* tertinggi.



Gambar 4.9 Hasil XRD deposit material yang terdapat pada bagian dalam pipa *water injection*

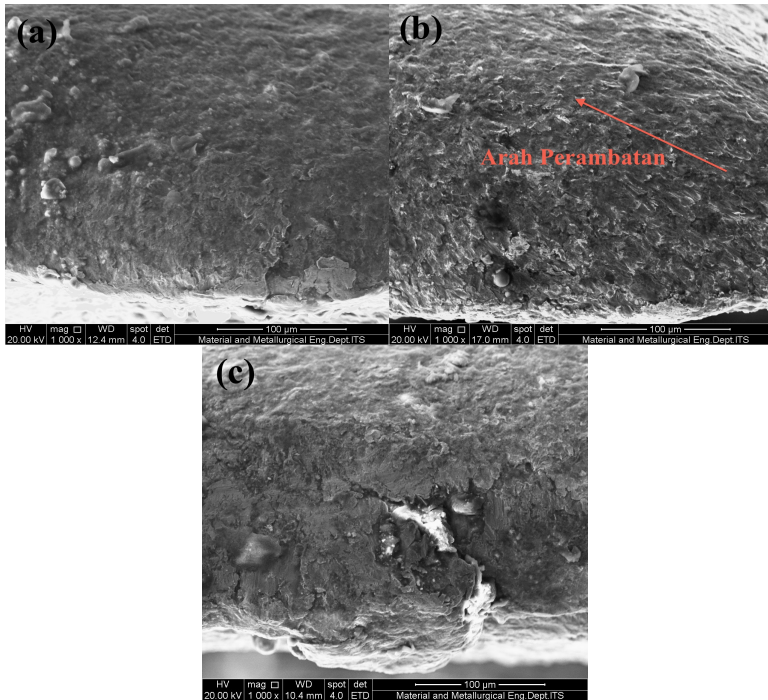
Gambar 4.9 menunjukkan hasil XRD deposit material yang terdapat pada bagian dalam pipa *water injection*. Didapatkan fasa dominan dari hasil XRD diatas yaitu calcium carbonate (CaCO_3). Selain itu juga terdapat silika (SiO_2), cristobalite (SiO_2), dan larnite (Ca_2SiO_4). Kartu JCPDS yang digunakan untuk mengidentifikasi fasa pada deposit material yang terdapat pada bagian dalam pipa *water injection* yaitu 96-702-2028 (calcite), 96-412-4046 (silika), 96-901-3427 (cristobalite), dan 96-901-2794 (larnite).

4.1.6 Uji Fraktografi

Uji fraktografi dilakukan menggunakan *Scanning Electron Microscope* (SEM). Pengujian ini dilakukan untuk memperlihatkan pola patahan yang terjadi pada permukaan



patahan pada daerah *initial crack*, *crack propagation*, dan *final crack* dengan perbesaran 1000 kali.



Gambar 4.10 Hasil SEM pada perpatahan daerah (a) *initial crack*, (b) *crack propagation*, dan (c) *final crack*

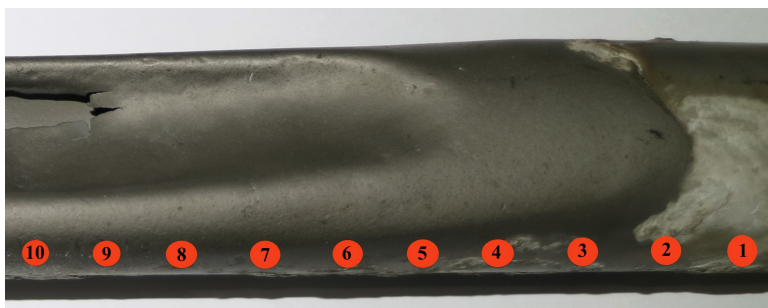
Gambar 4.10 memperlihatkan hasil SEM untuk perpatahan daerah *initial crack*, *crack propagation*, dan *final crack*. Gambar 4.10 (a) memperlihatkan permukaan daerah *initial crack*. Daerah ini memiliki morfologi permukaan yang lebih terang dan halus dibandingkan gambar lainnya (Ratna, 2014). Selain itu juga terlihat mulai adanya arah perambatan retak. Gambar 4.10 (b) memperlihatkan permukaan daerah *crack propagation*. Daerah ini memiliki morfologi permukaan yang lebih gelap, cukup kasar, dan memperlihatkan adanya striasi yang mengidentifikasi

BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

posisi perambatan pada patahan. Posisi perambatan ini menuju akhir dari patahanan. Gambar 4.10 (c) memperlihatkan permukaan daerah *final crack*. Daerah ini memiliki morfologi permukaan yang kasar dengan ditunjukkan adanya perbedaan tinggi permukaan. Dan tidak adanya lagi striasi pada pola patahan ini menunjukkan bahwa perpatahan telah berakhir

4.1.7 Uji Kekerasan

Pengujian kekerasan dilakukan untuk mengetahui distribusi nilai kekerasan pada *water injection* yang mengalami kegagalan. Metode yang digunakan adalah *Brinell Hardness Test* dengan beban 187.5 kgf berdasarkan ASTM E-10. Pengujian ini menggunakan indentasi sebanyak 10 titik. Indentasi tersebut tersebar merata pada daerah yang dekat dan jauh dari patahan. Pembagian daerah indentasi dapat dilihat pada Gambar 4.11.

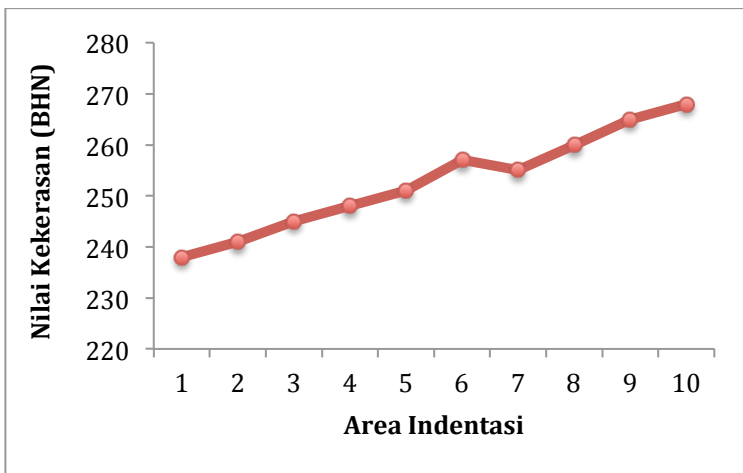


Gambar 4.11 Daerah indentasi pengujian kekerasan pada *water injection*



Tabel 4.4 Nilai Kekerasan pada *Water Injection* Berdasarkan Area Indentasi

Area Indentasi	Nilai Kekerasan (BHN)
1	238
2	241
3	245
4	248
5	251
6	257
7	255
8	260
9	265
10	268



Gambar 4.12 Grafik persebaran nilai kekerasan pada *water injection*



Tabel 4.4 memperlihatkan nilai kekerasan berdasarkan area indentasi pada *water injection* yang mengalami kegagalan. Gambar 4.12 menunjukkan grafik nilai kekerasan yang mengalami peningkatan. Dimulai dari area indentasi 1 dengan besar nilai kekerasan 238 BHN terus meningkat pada area indentasi 10 dengan besar nilai kekerasan 268 BHN.

4.1.8 Ketebalan Dinding Pipa Terhadap Tekanan Internal

Berdasarkan data operasi dibawah ini, maka didapatkan perhitungan nilai ketebalan dinding pipa sebagai berikut:

$$P = 3 \text{ bar} = 43.511 \text{ Psig}$$

$$D = 1.315 \text{ in}$$

$$S = 16700 \text{ (Table K-1)}$$

$$E = 0.8 \text{ (Table A-1B)}$$

$$Y = 0.4 \text{ (Table 304.1.1)}$$

$$CA = 0$$

$$^{\circ}T = 25 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

- $$t = \frac{PD}{2(SE+PY)} = \frac{43.511 \times 1.315}{2((16700 \times 0.8) + (43.511 \times 0.4))} = 0.0021 \text{ in}$$
- $$t_m = t + CA = 0.0021 + 0 = 0.0021 \text{ in}$$
- $$t_{nom} = \frac{tm}{0.875} = \frac{0.0021}{0.875} = 0.0024 \text{ in} = 0.06 \text{ mm}$$

Didapatkan nilai ketebalan nominal untuk pipa *water injection* dengan tekanan fluida sebesar 3 bar dan temperatur fluida sebesar 25 $^{\circ}\text{C}$ adalah 0.0024 in atau 0.06 mm.

4.1.9 Nilai Microstrain Broadening

Tabel 4.5 dan 4.6 menunjukkan data hasil XRD serta perhitungan nilai *microstrain broadening* pada permukaan *raw material water injection* dan *fail material water injection*.



Didapatkan nilai *microstrain broadening* pada permukaan *fail material* lebih besar dibandingkan *raw material*.

Tabel 4.5 Data XRD dan *Microstrain Broadening* pada Permukaan *Raw Material Water Injection*

2θ	θ	B	ε
43.3426	21.6713	0.1020	0.0641
50.5332	25.2666	0.1428	0.0756
74.4265	37.2128	0.0816	0.0268

Tabel 4.6 Data XRD dan *Microstrain Broadening* pada Permukaan *Fail Material Water Injection*

2θ	θ	B	ε
43.4265	21.71325	0.1171	0.0735
50.5804	25.2902	0.1673	0.0885
74.5429	37.27145	0.2676	0.0879

4.2 Pembahasan

Hasil uji komposisi unsur menunjukkan kesesuaian kandungan unsur pada material *water injection* dengan SS 301L. Ini menunjukkan bahwa material yang digunakan untuk *water injection* yang ada di PT. Holcim Tuban Plant Indonesia merupakan baja tahan karat austenitik. SS 301L memiliki karakteristik tahan korosi dan *fatigue resistance* yang baik (Philip, 2004). Namun, baja tahan karat austenitik memiliki sifat ketahanan aus yang kurang baik (Arthur, 2010).

Berdasarkan pengamatan makroskopik didapatkan *water injection* yang telah mengalami deformasi dan penipisan. Deformasi ini menyebabkan penyaluran air pada *water injection* saat beroperasi tidak maksimal. Terhambatnya aliran air mengakibatkan arus laminar menjadi turbulen serta adanya pemusatan tegangan sehingga terjadilah penipisan akibat erosi oleh air pada bagian dalam pipa *water injection*. Pada awalnya pipa memiliki tebal 3.38 mm lalu mengalami pengurangan tebal hingga 3.20 mm menjadi 0.18 mm. Air yang terus-menerus

BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN



mengalir dengan tekanan 3 bar terus mengikis ketebalan pipa, sehingga di bagian pipa tertentu mengalami patah akibat tebal yang terus berkurang tidak mampu menahan tekanan air yang mengalir. Fenomena ini dibuktikan dengan gambar 4.2 yang menunjukkan pipa *water injection* mengalami kebocoran akibat patahnya permukaan dalam pipa.

Pengamatan makroskopik ini juga menunjukkan pola permukaan patahan atau fraktografi yang terjadi. Gambar 4.10 memperlihatkan fraktografi dengan perbesaran yang lebih dalam (1000 kali) pada daerah *initial crack*, *crack propagation*, dan *final crack*. *Initial crack* menunjukkan daerah yang mengalami patah pertama. Ini menunjukkan bahwa daerah tersebut memiliki tegangan terbesar akibat deformasi yang kemudian dilanjutkan dengan penipisan oleh air yang terus mengalir dan akhirnya patah akibat tidak mampu menerima tekanan. Menurut Nishida (1992), awal retak biasanya dimulai dari permukaan. Hal ini terjadi karena permukaan menerima beban terbesar dan paling memungkinkan terjadinya konsentrasi tegangan yang disebabkan oleh adanya perubahan dimensi pada permukaan. *Crack propagation* merupakan daerah yang menunjukkan penalaran retak yang terjadi. Dan *final crack* merupakan daerah yang menunjukkan akhir dari retak dengan bentuk permukaan yang kasar (Callister, 2007).

Berdasarkan pengamatan mikroskopik didapatkan fasa austenite sebagai fasa utama dari baja tahan karat austenitik (Wei, 2014). Pada daerah *cross section* pipa *water injection* yang mengalami deformasi dan tidak mengalami deformasi didapatkan morfologi butir yang berbeda. Perbedaanannya adalah butir lebih kecil, panjang, dan pipih terlihat pada daerah yang terdeformasi. Sementara pada daerah yang tidak mengalami deformasi memiliki butir yang berukuran lebih besar. Hal ini menunjukkan adanya proses *strain hardening* akibat dari deformasi yang terjadi pada daerah pipa yang terdeformasi. Perubahan morfologi butir tersebut dibuktikan dengan perhitungan ukuran butir menggunakan metode Jeffries. Didapatkan ukuran butir pada



daerah terdeformasi sebesar $1.35 \mu\text{m}^2$. Sementara ukuran butir pada daerah yang tidak terdeformasi sebesar $1.479 \mu\text{m}^2$. *Strain hardening* adalah proses penguatan logam akibat deformasi plastik (perubahan bentuk secara permanen atau tidak dapat kembali seperti semula). Penguatan ini terjadi karena dislokasi dan *slip* dalam struktur kristal dari material (Callister, 2007).

Selanjutnya, pengamatan mikroskopik pada daerah patah dan tidak patah didapatkan kesamaan morfologi butir. Ini menunjukkan tidak adanya pengaruh dari proses patah yang terjadi pada material *water injection* terhadap morfologi butir. Dapat disimpulkan bahwa fenomena patahan ini diakibatkan oleh proses penipisan dari aliran air yang tekanannya terkonsentrasi terus-menerus di daerah dalam pipa *water injection* yang terdeformasi.

Salah satu penyebab pengurangan berat pada logam adalah korosi. Selain itu, adanya deposit material yang terdapat di dalam permukaan pipa *water injection* memungkinkan menjadi penyebab terjadinya penipisan. Dilakukannya uji senyawa pada penelitian kali ini bertujuan untuk membuktikan apakah korosi dan deposit material menjadi penyebab penipisan pada pipa *water injection*. Berdasarkan uji senyawa pada spesimen deposit material didapatkan senyawa calcium carbonate (CaCO_3). Calcium carbonate atau batu kapur yang dominan pada deposit material menunjukkan bahwa deposit material yang terdapat pada pipa *water injection* merupakan semen. Batu kapur, pasir silika, *clay*, dan *iron ore* merupakan *raw material* penyusun semen yang menjadi produk utama dari PT. Holcim Tuban Plant Indonesia. Selanjutnya uji senyawa didapatkan hasil pada spesimen permukaan dalam *raw material water injection* dan pada daerah gagal memiliki fasa dominan yang sama, yaitu $\gamma\text{-Fe}$. Dapat disimpulkan bahwa tidak ada perubahan fasa pada material *water injection* setelah mengalami deformasi dan penipisan. SS 301L merupakan jenis baja tahan karat austenitik yang memiliki fasa dominan $\gamma\text{-Fe}$ pada temperature kamar (Wei, 2014). Dengan tidak adanya produk korosi dan/atau senyawa calcium carbonate pada

BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN



permukaan dalam *water injection* daerah *raw material* dan pada daerah gagal, ini membuktikan bahwa korosi dan/atau deposit material bukanlah penyebab penipisan pada pipa *water injection*. Hal ini juga menunjukkan bahwa deposit material masuk ke dalam pipa *water injection* disaat komponen ini tidak beroperasi. *Erosive wear* adalah fenomena aus yang disebabkan oleh tumbukan gas, liquid, atau partikel yang terkandung di dalam liquid (Robinowicz, 1965).

Berdasarkan uji kekerasan yang dilakukan terjadi kenaikan nilai kekerasan dari daerah yang jauh dari patahan ke daerah yang dekat patahan. Hal ini menunjukkan pada daerah dekat patahan mengalami peningkatan tegangan akibat deformasi yang terjadi. Menurut Miyamoto (2012), hal ini dikarenakan efek *strain hardening* di bagian yang terkena deformasi. Fenomena ini diperkuat dengan tabel 4.4 dan 4.5 yang menunjukkan nilai *microstrain boardening* pada daerah kegagalan lebih besar dibandingkan pada *raw material water injection*. Selain itu, menurut Totten dkk (2002), peningkatan kekerasan juga dapat mengindikasikan adanya *residual stress*. Menurut Hou dkk (2011) dan Lu dkk (2008), meningkatnya *residual stress* berarti juga meningkatkan *residual strain*, sehingga *yield strength* meningkat dan memicu laju regangan *crack tip* dan pertumbuhan *crack* yang lebih besar.

Berdasarkan perhitungan ketebalan dinding pipa terhadap tekanan internal didapatkan nilai nominal ketebalan dinding pipa *water injection* dengan tekanan internal air sebesar 3 bar adalah 0.0024 in atau 0.06 mm. Perhitungan ini menunjukkan bahwa dalam keadaan normal, tekanan 3 bar mampu ditahan oleh dinding pipa *water injection* dengan ketebalan 0.06 mm. Namun kondisi lapangan memperlihatkan ketebalan paling tipis yang terdapat pada pipa *water injection* yang mengalami kegagalan adalah 0.18 mm. Nilai ini menunjukkan bahwa dengan ketebalan 0.18 mm, pipa *water injection* sudah tidak mampu lagi menerima tekanan yang ada sehingga menyebabkan perpatahan pada permukaan dalam pipa. Hal ini dapat terjadi dikarenakan pipa



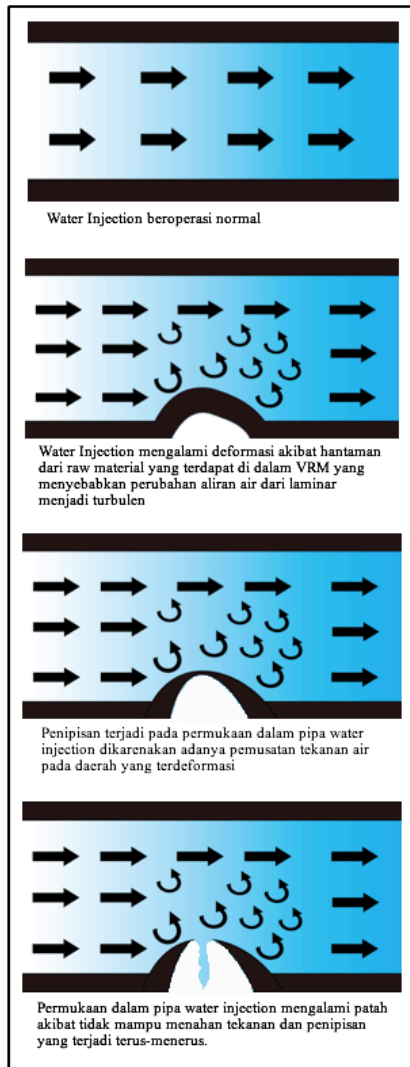
water injection dalam keadaan tidak normal (akibat deformasi sebelumnya) saat menerima penipisan dan tekanan yang terus-menerus terjadi. Logam yang mempunyai banyak cacat artinya tidak sekuat logam yang tanpa cacat, dan ini merupakan hal yang buruk dari aspek perancangan produk (Surdia, 1992).

Berdasarkan nilai *microstrain broadening* didapatkan nilai *microstrain broadening* pada permukaan *fail material* lebih besar dibandingkan *raw material*. Ini menunjukkan bahwa permukaan *fail material* telah mengalami peregangan akibat deformasi yang terjadi. Peningkatan *residual strain* mengindikasikan peningkatan nilai *residual stress* yang dapat memicu laju pertumbuhan *crack* (Lu dkk, 2008).

4.2.1 Mekanisme Kegagalan

Berdasarkan hasil pengujian yang telah dilakukan, faktor-faktor penyebab kegagalan dapat disederhanakan menjadi tiga aspek yaitu tegangan, material, dan kondisi lingkungan. Dari aspek tegangan, dapat diketahui bahwa adanya *residual stress* dan *strain hardening* yang terjadi akibat proses deformasi. Selain itu, terpusatnya tegangan air yang mengalir pada daerah yang terdeformasi mengakibatkan terjadinya penipisan. Selanjutnya, aspek material menjelaskan bahwa SS 301L memiliki sifat tahan aus yang kurang baik, sehingga tidak mampu menahan erosi akibat aliran air yang terpusat di daerah yang terdeformasi. Sementara aspek lingkungan dapat dilihat dari sistem yang ada pada *water injection*. *Raw material* penyusun semen yang terdapat di dalam VRM, besarnya tekanan air yang diberikan, dan desain *water injection* di dalam VRM memungkinkan hal-hal ini menjadi penyebab kegagalan yang ada.

Mekanisme dari kegagalan *water injection* yang ada di PT. Holcim Indonesia Tuban Plant terdiri dari tiga tahap, yaitu deformasi, penipisan, dan retak/patah seperti yang digambarkan pada Gambar 4.13.



Gambar 4.13 Ilustrasi tahapan kegagalan *water injection*



Tahap Deformasi

Aspek lingkungan sangat memengaruhi terjadinya proses deformasi ini. *Raw material* penyusun semen yang terdapat di dalam VRM memungkinkan penyebab terjadinya deformasi pada *water injection*. Hantaman dari raw material terhadap permukaan luar pipa *water injection* pada saat VRM beroperasi merupakan awal dari deformasi. Hal ini dibuktikan pada gambar 4.7 terdapat fenomena *strain hardening* akibat dari proses deformasi yang terjadi. Pada gambar 4.12, kenaikan nilai kekerasan di daerah yang terdeformasi menunjukkan pengaruh adanya fenomena *strain hardening*. Fenomena ini diperkuat dengan tabel 4.5 dan 4.6 yang menunjukkan nilai *microstrain boardening* pada daerah kegagalan lebih besar dibandingkan pada *raw material water injection*. Kenaikan nilai kekerasan ini mengindikasikan adanya *residual stress* dan *residual strain* yang dapat memicu laju pertumbuhan *crack* lebih besar (Lu dkk, 2008).

Tahap Penipisan

Aspek tegangan dan material menjadi bahasan pada tahapan ini. Deformasi yang terjadi pada pipa *water injection* mengakibatkan aliran air di dalam pipa *water injection* pada saat beroperasi berubah, dari laminar menjadi turbulen. Ini disebabkan adanya pemusatan tegangan akibat perubahan bentuk dari pipa *water injection* (Umar, 2012). Gambar 4.8 menunjukkan tidak adanya produk korosi dan senyawa penyusun semen yang memungkinkan menjadi penyebab dari proses penipisan. Aliran air merupakan satu-satunya penyebab adanya penipisan. Tekanan air sebesar 3 bar yang secara terus-menerus mengalir mengakibatkan daerah yang terdeformasi mulai menipis. Hal ini dikarenakan SS 301L merupakan baja tahan karat austenitik yang memiliki sifat kurang baik dalam ketahanan aus (Arthur, 2010). Pada awalnya pipa memiliki ketebalan dinding sebesar 3.38 mm. Namun, seiring dengan proses penipisan mengakibatkan ketebalan dinding pipa hanya tersisa 0.18 mm.



Tahap Retak/Patah

Ini merupakan tahapan akhir dari kegagalan pada *water injection* yang ada di PT. Holcim Tuban Plan Indonesia. Tahap ini terjadi akibat dari proses penipisan yang berlangsung terus-menerus. Permukaan dalam pipa terdeformasi yang bersentuhan langsung dengan aliran air tidak mampu lagi menahan tegangan dan penipisan yang terjadi. Sehingga fenomena retak atau patah tidak dapat dihindari (Nishida, 1992). Gambar 4.10 (a) menunjukkan lokasi perpatahan pertama kali terjadi dan dilanjutkan dengan gambar 4.10 (b) dan (c) yang menunjukkan arah perambatan patahan hingga menuju akhir perpatahan. Gambar 4.6 menunjukkan morfologi butir yang tidak mengalami perubahan akibat penipisan. Hal ini menunjukkan bahwa patahan terjadi akibat permukaan pipa yang terus-menerus menipis oleh aliran air.



(Halaman ini sengaja dikosongkan)



BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan serangkaian percobaan dan analisa yang telah dilakukan, terdapat beberapa kesimpulan mengenai kegagalan *water injection* pada *vertical roller mill* antara lain sebagai berikut:

1. Mekanisme kegagalan komponen *water injection* pada *vertical roller mill* diawali oleh deformasi permukaan pipa akibat hantaman *raw material* penyusun semen yang kemudian disusul oleh penipisan permukaan pipa akibat pemusatan tekanan air yang terus-menerus mengalir dan akhirnya terjadi perpatahan dikarenakan permukaan pipa yang tidak mampu menahan penipisan dan tekanan.
2. Faktor yang menyebabkan terjadinya kegagalan komponen *water injection* pada *vertical roller mill* yaitu kesalahan pemilihan material, deformasi serta penipisan yang diakhiri patah.

5.2 Saran

1. Menambahkan pelindung permukaan pipa pada daerah yang tidak terdapat lubang air.
2. Dengan desain yang sama, memilih material baja tahan karat dengan sifat ketahanan aus yang lebih baik.
3. Melakukan *surface hardening* terhadap material *water injection*.



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR PUSTAKA

- _____. 2002. **ASM Handbook Vol.9 Metallographic and Microstructure**. Material Park. Ohio. USA. ASM International.
- _____. 2002. **ASM Handbook Vol.12 Fractography**. Material Park. Ohio. USA. ASM International.
- _____. 2002. **ASM Handbook Vol.19 Fatigue and Fracture**. Material Park. Ohio. USA. ASM International.
- Avner, Sidney H. 2004. **Introduction to Physical Metallurgy**. New York: McGraw Hill.
- Callister, William. 2007. **Material Science and Engineering An Introduction**. New York : John Wiley & Sons, Inc.
- Dieter, George E. 1987. **Metalurgi Mekanik**. Jakarta : Erlangga.
- Fadli. 2011. **Studi Korosi Baja API 5L GBN didalam Larutan Asam Sulfat 1M dengan Penambahan Inhibitor Aniline-4 Sulfonate**. Depok: FMIPA, Universitas Indonesia
- Faruk, Umar. 2012. **Analisis Pengaruh Aliran Tubulen Terhadap Karakteristik Lapisan Batas pada Datar Panas**. Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Heuer, Arthur. 2010. **Tribology of 316L Austenitic Stainless Steel Carburized at Low Temperature**. Case Western Reserve University.
- Hou, J. et al., 2011. **Effect of Cold Working Path on Strain Concentration, Grain Boundary Microstructure, and Stress Corrosion Cracking in Alloy 600**. Elsevier, Volume 53, pp. 2956-2962.
- Jensen, R.D Lucas dkk. 2011. **Wear Mechanism Of Abrasion Resistant Wear Parts In Raw Vertical Roller Mills**. Denmark : Technical University Of Denmark
- Kartikasari, Ratna. 2014. **Analisis Kerusakan Poros Brine Injection Pump**. STTNAS Yogyakarta.
- Kroschwitz, J. 1990. **Polymer Characterization and Analysis**. Canada : John Wiley and Sons Inc.

- Lu, Z. et al., 2008. **The Dependency of The Crack Growth Rate on The Loading Pattern and Temperature in Stress Corrosion Cracking of Strain-Hardened 316L Stainless Steel in Simulated BWR Environment.** Elsevier, Volume 50, pp. 698-712.
- Miyamoto, H., Saburi, D. & Fujiwara, H., 2012. **A microstructural Aspect of Intergranular Stress Corrosion Cracking of Semi-Hard U-Bend Tubes of Commercially Pure Copper in Cooling Systems.** Elsevier, Volume 26, pp. 108-119.
- Nishida, Shin-ichi.1992. **Failure Analysis in Engineering Application.** Jordan Hill. Oxford. Butterworth-Heinemann Ltd.
- Philip, P., Sagaspe, P., Taillard, J., Moore, N., Guillemineault, C., Sanchez-Ortuno, M., et al. (2003). **Fatigue, sleep restriction, and performance in automobile drivers: a controlled study in a natural environment.** Sleep, 26(3), 277-280
- R. Brooks, Charlie and Choudhury, Ashok. 2002. **Failure Analysis of Engineering Materials.** New York : McGraw-Hill.
- Rabinowicz. 1965. **Adeshive Wear, Friction and Wear of Materials.** New York: John Wiley and Sons, p 159-162.
- Surdia, Tata dan Saito, Shinroku. 1992. **Pengetahuan Bahan Teknik.** Pradnya Paramita. Jakarta
- Totten, G., Howes, M. & Inoue, T., 2002. **Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel.** 1st penyunt. Materials Park: ASM Internasional.
- W.R. Chen, J. Triantafillou, J. Beddoes, and L. Zhao, **Intermetallics**, Vol 7, 1999, pp 171
- Wei, D. 2014. **Effects of Oxide Scale on Hot Rolling of An Austenitic Stainless Steel.** International Journal of Surface Science and Engineering, 8 (2-3), 173-187.

LAMPIRAN

1. Table K-1 (ASME B31.3)

TABLE K-1
ALLOWABLE STRESSES IN TENSION FOR METALS FOR CHAPTER IX^{1-6, 18}
 Numbers in Parentheses Refer to Notes for Appendix K Tables; Specifications are ASTM Unless Otherwise Indicated

Material	Spec. No.	P-No. or S-No. (7)	Type or Grade	Notes	Specified Min. Strength, ksi	
					Tensile	Yield
Low and Intermediate Alloy Steel (Cont'd)						
Pipes and Tubes (17) (cont'd)						
3½Ni	A 333	9B	3 }			
3½Ni	A 334	9B	3 }	(8)	65	35
9Ni	A 333	11A	8			
9Ni	A 334 }			(8)	100	75
Forgings and Fittings						
3½Ni	A 420	9B	WPL3	(8)	65	35
3½Ni	A 350	9B	LF3	...	70	37.5
1Cr-½Mo	A 182	4	F12, Cl. 2	...	70	40
1¼Cr-½Mo	A 182	4	F11, Cl. 2	...	70	40
C-½Mo	A 182	3	F1	...	70	40
5Cr-½Mo	A 182	5B	F5	...	70	40
2¼Cr-1Mo	A 182	5A	F22, Cl. 3	...	75	45
9Ni	A 420	11A	WPL8	(8)	110	75
3½Ni-1¼Cr-½Mo	A 508	11A	4N, Cl. 2	...	115	100
Ni-Cr-Mo	A 723	...	1, 2, 3 Cl. 1	(11)	115	100
Ni-Cr-Mo	A 723	...	1, 2, 3 Cl. 2	(11)	135	120
Ni-Cr-Mo	A 723	...	1, 2, 3 Cl. 3	(11)	155	140
Stainless Steel (5)						
Pipes and Tubes (17)						
16Cr-12Ni-2Mo	A 312	8	TP316L	(12)	} 70	25
316L, A 240	A 358	8	316L, Cl. 1 & 3	(12)(13)		
16Cr-12Ni-2Mo-N	A 312	8	TP316LN	(12)	} 75	30
316LN, A 240	A 358	8	316LN, Cl. 1 & 3	(12)(13)		
18Cr-8Ni	A 312	8	TP304L	(12)	} 70	25
304L, A 240	A 358	8	304L, Cl. 1 & 3	(12)(13)		
18Cr-8Ni-N	A 312	8	TP304LN	(12)	} 75	30
304LN, A 240	A 358	8	304L, Cl. 1 & 3	(12)(13)		

(continued)

TABLE K-1
ALLOWABLE STRESSES IN TENSION FOR METALS FOR CHAPTER IX^{1-6, 18}
Numbers in Parentheses Refer to Notes for Appendix K Tables; Specifications are ASTM Unless Otherwise Indicated

Allowable Stress, ksi (Multiply by 1000 to Obtain psi), for Metal Temperature, °F, Not Exceeding								Type or Grade	Spec. No.
100	200	300	400	500	600	650	700	Low and Intermediate Alloy Steel (Cont'd) Pipes and Tubes (17) (Cont'd)	
23.3	21.3	20.7	20.0	18.9	17.3	17.0	15.7	3	A 333 A 334 A 333
50.0	31.7	...	...	...	...	...	...	8	A 333 A 334
Forgings and Fittings									
23.3	21.3	19.6	...	...	...	...	...	WPL3	A 420
25.0	22.8	22.1	...	...	...	...	...	LF3	A 350
26.7	24.1	22.7	21.7	20.9	20.3	20.1	19.7	F12, Cl. 2	A 182
26.7	24.6	23.4	22.5	21.7	20.9	20.5	20.1	F11, Cl. 2	A 182
26.7	24.6	23.4	22.5	21.7	20.9	20.5	20.1	F1	A 182
26.7	24.1	23.2	22.9	22.7	22.4	22.1	21.7	F5	A 182
30.0	27.5	26.1	25.5	24.8	24.3	24.0	23.7	F22, Cl. 3	A 182
50.0	31.7	...	...	...	...	...	...	WPL8	A 420
66.7	62.8	60.8	59.5	58.5	57.4	56.7	...	4N, Cl. 2	A 508
66.7	64.0	62.3	61.3	60.3	59.3	58.5	57.3	1, 2, 3 Cl. 1	A 723
80.0	76.8	74.8	73.6	72.4	71.2	70.1	68.8	1, 2, 3 Cl. 2	A 723
93.3	89.6	87.3	85.9	84.5	83.1	81.9	80.3	1, 2, 3 Cl. 3	A 723
Stainless Steel (5) Pipes and Tubes (17)									
16.7	16.7	16.7	15.8	14.8	14.0	13.8	13.5	TP316I 316L, Cl. 1 & 3	A 312 A 358
20	20	20	18.9	17.5	16.5	16.0	15.6	TP316LN 316LN, Cl. 1 & 3	A 312 A 358
16.7	16.7	16.7	15.8	14.7	14.0	13.7	13.4	TP304I 304I, Cl. 1 & 3	A 312 A 358
20.0	20.0	20.0	18.6	17.5	16.4	16.1	15.9	TP304LN 304LN, Cl. 1 & 3	A 312 A 358

2. Table A-1B

TABLE A-1B (CONT'D)
BASIC QUALITY FACTORS FOR LONGITUDINAL WELD JOINTS IN PIPES, TUBES, AND FITTINGS E_f
 These quality factors are determined in accordance with para. 302.3.4(a). See also para. 302.3.4(b) and Table 302.3.4 for increased quality factors applicable in special cases. Specifications, except API, are ASTM.

Spec. No.	Class (or Type)	Description	E_f (2)	Appendix A Notes
Low and Intermediate Alloy Steel (Cont'd)				
A 334	...	Seamless tube	1.00	...
A 335	...	Seamless pipe	1.00	...
A 350	...	Forgings and fittings	1.00	...
A 369	...	Seamless pipe	1.00	...
A 420	...	Welded fittings, 100% radiographed	1.00	(16)
A 671	12, 22, 32, 42, 52	Electric fusion welded pipe, 100% radiographed	1.00	...
	13, 23, 33, 43, 53	Electric fusion welded pipe, double butt seam	0.85	...
A 672	12, 22, 32, 42, 52	Electric fusion welded pipe, 100% radiographed	1.00	...
	13, 23, 33, 43, 53	Electric fusion welded pipe, double butt seam	0.85	...
A 691	12, 22, 32, 42, 52	Electric fusion welded pipe, 100% radiographed	1.00	...
	13, 23, 33, 43, 53	Electric fusion welded pipe, double butt seam	0.85	...
Stainless Steel				
A 182	...	Forgings and fittings	1.00	...
A 268	...	Seamless tube	1.00	...
	...	Electric fusion welded tube, double butt seam	0.85	...
	...	Electric fusion welded tube, single butt seam	0.80	...
A 269	...	Seamless tube	1.00	...
	...	Electric fusion welded tube, double butt seam	0.85	...
	...	Electric fusion welded tube, single butt seam	0.80	...
A 312	...	Seamless tube	1.00	...
	...	Electric fusion welded tube, double butt seam	0.85	...
	...	Electric fusion welded tube, single butt seam	0.80	...
A 358	1, 3, 4	Electric fusion welded pipe, 100% radiographed	1.00	...
	5	Electric fusion welded pipe, spot radiographed	0.90	...
	2	Electric fusion welded pipe, double butt seam	0.85	...
A 376	...	Seamless pipe	1.00	...
A 403	...	Seamless fittings	1.00	...
	...	Welded fitting, 100% radiographed	1.00	(16)
	...	Welded fitting, double butt seam	0.85	...
	...	Welded fitting, single butt seam	0.80	...
A 409	...	Electric fusion welded pipe, double butt seam	0.85	...
	...	Electric fusion welded pipe, single butt seam	0.80	...
A 487	...	Steel castings	0.80	(9)(40)

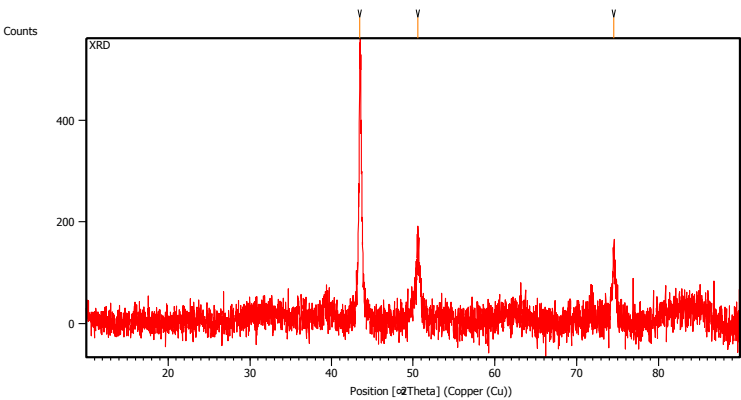
3. Table 304.1.1

TABLE 304.1.1
VALUES OF COEFFICIENT γ
FOR $t < D/6$

Materials	Temperature, °C (°F)					
	≤ 482 (900 & Lower)	510 (950)	538 (1000)	566 (1050)	593 (1100)	≥ 621 (1150 & Up)
Ferritic steels	0.4	0.5	0.7	0.7	0.7	0.7
Austenitic steels	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5	0.7
Other ductile metals	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
Cast iron	0.0	...	...	...	...	...

4. Hasil XRD pada Fail Material Water Injection

Main Graphics, Analyze View:

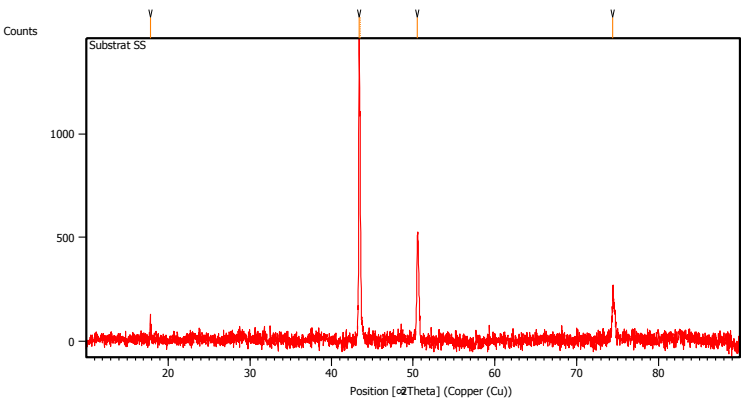


Peak List:

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
43.4265	547.39	0.1171	2.08383	100.00
50.5804	142.54	0.1673	1.80461	26.04
74.5429	139.63	0.2676	1.27303	25.51

5. Hasil XRD pada Raw Material Water Injection

Main Graphics, Analyze View:

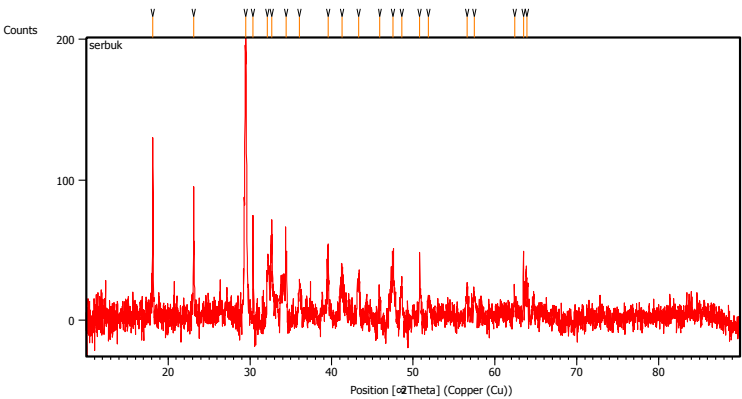


Peak List:

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
17.8581	73.32	0.1004	4.96701	5.44
43.3426	1346.87	0.1020	2.08594	100.00
43.4747	976.14	0.0612	2.08507	72.47
50.5332	481.14	0.1428	1.80469	35.72
74.4265	263.39	0.0816	1.27368	19.56

6. Hasil XRD pada Deposit Material

Graphics:



Peak List:

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
18.1443	117.08	0.0669	4.88930	59.72
23.1335	94.52	0.0502	3.84489	48.21
29.4888	196.04	0.2007	3.02913	100.00
30.3966	39.05	0.1004	2.94071	19.92
32.1392	38.73	0.2342	2.78513	19.76
32.6815	72.29	0.1673	2.74014	36.87
34.4186	43.73	0.1673	2.60572	22.31
36.0597	21.06	0.2007	2.49081	10.74
39.5713	46.11	0.1338	2.27749	23.52
41.2819	25.31	0.4015	2.18699	12.91
43.2620	27.40	0.2676	2.09137	13.98
45.9337	19.86	0.2676	1.97576	10.13
47.5653	47.78	0.2007	1.91172	24.37
48.6426	32.76	0.2007	1.87187	16.71
50.8158	50.99	0.0612	1.79532	26.01
51.9042	13.92	0.3346	1.76166	7.10
56.6150	22.54	0.2007	1.62575	11.50
57.4812	18.93	0.2676	1.60330	9.66
62.4121	8.65	0.4015	1.48796	4.41
63.5035	38.88	0.0816	1.46378	19.84
63.9180	18.60	0.2007	1.45649	9.49

7. JCPDS 96-901-4712

Entry # 96-901-4712

Phase classification

Name	
Mineral Name	Iron
Formula	Fe
I/Ic	9.720000
Sample Name	9014711
Quality	C (calculated)

References

Publication

Bibliography Nishihara Y., Nakajima Y., Akashi A., Tsujino N., Takahashi E., Funakoshi K., Higo Y., "Isothermal compression of face-centered cubic iron: Note: gamma Iron, Sample M620, P = 6.81 GPa, T = 1273 K", American Mineralogist **97**, 1417-1420 (2012)

Origin of data

Source of entry [COD \(Crystallography Open Database\)](#)

Link to orig. entry [9014711](#)

Crystal structure

Crystallographic data

Space group Fm -3 m (225)

Crystal system cubic

Cell parameters a = 3.5950 Å

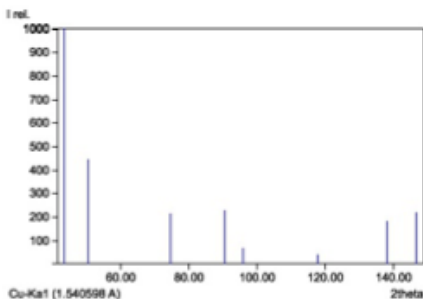
Atom coordinates	Element	Oxid.	x	y	z	Bi	Fooc
	Fe		0.000	0.000	0.000	1.000000	1.000000

Diffraction data

Diffraction lines

d [Å]	Int.	h	k	l	Mult.
2.0756	1000.0	1	1	1	8
1.7975	446.1	2	0	0	6
1.2710	214.2	2	0	2	12
1.0839	227.3	3	1	1	24
1.0378	65.8	2	2	2	8
0.8988	38.6	4	0	0	6
0.8247	182.9	3	1	3	24
0.8039	218.8	4	0	2	24

Diffraction pattern graphics



8. JCPDS 96-412-4046

Entry # 96-412-4046

Phase classification

Name	Si O ₂
Formula	O ₂ Si
I/Ic	2.850000
Sample	4124045
Name	
Quality	C (calculated)

References

Publication

Bibliography Foster M.D., Friedrichs O.D., Klinowski J., Bell R.G., Paz F.A.A., "Chemical evaluation of hypothetical uninoal zeolites", Journal of the American Chemical Society **126**, 9769-9775 (2004)

Origin of data

Source of entry [COD \(Crystallography Open Database\)](#)

Link to orig. entry [4124045](#)

Crystal structure

Crystallographic data

Space group	I 4/m c m (140)
Crystal system	tetragonal
Cell parameters	a= 13.8966 Å c= 8.8966 Å
Z	32

Atom	Element	Oxid.	x	y	z	Bi	Focc
coordinates	O		0.266	0.000	0.250	1.000000	1.000000
	O		0.355	0.645	0.750	1.000000	1.000000
	O		0.331	0.831	0.795	1.000000	1.000000
	Si		0.260	0.601	0.675	1.000000	1.000000
	O		0.720	0.413	0.500	1.000000	1.000000

Diffraction data

Diffraction lines

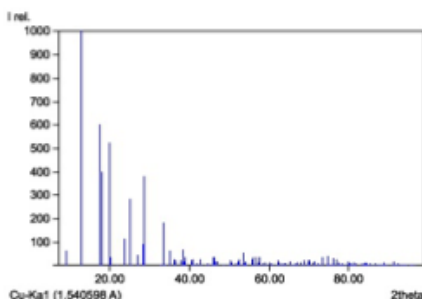
d (Å)	Int.	h	k	l	Mult.
9.8264	60.4	1	1	0	4
6.9483	1000.0	2	0	0	4
5.0948	601.4	2	1	1	16
4.9132	398.4	2	2	0	4
4.4483	521.1	0	0	2	2
4.3945	33.2	1	3	0	8
4.0524	0.0	1	1	2	8
3.7463	115.0	2	0	2	8
3.5366	283.5	3	2	1	16
3.4741	0.1	4	0	0	4
3.2976	43.6	2	2	2	8
3.2755	4.0	3	3	0	4
3.1518	88.7	4	1	1	16
3.1262	0.1	3	1	2	16
3.1074	379.4	2	4	0	8
2.7380	1.7	4	0	2	8
2.7253	0.2	1	5	0	8
2.6764	181.7	2	1	3	16
2.6529	3.9	4	3	1	16
2.6376	4.2	3	3	2	8
2.5474	61.2	4	2	2	16
2.4784	23.6	5	2	1	16
2.4566	18.8	4	4	0	4
2.3832	19.4	3	5	0	8
2.3503	64.8	3	2	3	16
2.3239	17.5	5	1	2	16
2.3161	35.9	6	0	0	4
2.2264	0.2	4	1	3	16
2.2241	21.7	0	0	4	2
2.2128	27.5	6	1	1	16

2.1972	1.7	2	6	0	8
2.1693	1.1	1	1	4	8
2.1505	4.9	4	4	2	8
2.1183	1.3	0	2	4	8
2.1084	27.2	5	4	1	16
2.1007	3.7	5	3	2	16
2.0543	2.6	6	0	2	8
2.0279	7.4	4	3	3	16
2.0262	8.7	2	2	4	8
2.0176	0.7	6	3	1	16
1.9845	3.2	3	1	4	16
1.9700	34.5	6	2	2	16
1.9653	34.3	1	7	0	8
1.9467	17.4	5	2	3	16
1.9271	13.8	4	6	0	8
1.8732	0.1	4	0	4	8
1.8664	2.8	7	2	1	16
1.8400	3.2	3	3	4	8
1.8247	2.1	3	7	0	8
1.8098	19.6	6	1	3	16
1.8086	0.1	4	2	4	16
1.7976	10.8	5	5	2	8
1.7683	5.9	6	4	2	16
1.7514	17.0	5	4	3	16
1.7447	6.4	6	5	1	16
1.7371	26.0	8	0	0	4
1.7232	1.2	5	1	4	16
1.7106	54.7	2	1	5	16
1.6983	8.5	6	3	3	16
1.6922	18.0	7	4	1	16
1.6882	0.2	7	3	2	16
1.6852	0.0	2	8	0	8
1.6488	24.1	4	4	4	8
1.6377	34.5	6	6	0	4
1.6260	1.7	5	3	4	16
1.6181	24.9	8	0	2	8
1.6155	34.8	3	2	5	16
1.6154	0.9	5	7	0	8
1.6051	7.1	7	2	3	16
1.6042	9.7	6	0	4	8
1.6000	34.7	8	3	1	16
1.5759	0.5	8	2	2	16
1.5735	5.1	4	1	5	16
1.5631	10.7	6	2	4	16
1.5537	0.4	4	8	0	8
1.5369	11.1	6	6	2	8
1.5346	4.8	1	9	0	8
1.5257	6.3	6	5	3	16
1.5184	0.0	7	5	2	16
1.4985	1.2	4	3	5	16
1.4902	21.0	7	4	3	16
1.4861	12.1	7	6	1	16
1.4828	6.6	0	0	6	2
1.4727	3.5	5	5	4	8
1.4668	0.3	8	4	2	16
1.4662	0.0	1	1	6	8
1.4649	3.8	5	2	5	16
1.4648	6.7	3	9	0	8
1.4565	4.6	6	4	4	16
1.4532	6.2	8	5	1	16
1.4507	0.0	9	1	2	16
1.4501	5.1	0	2	6	8
1.4261	17.7	8	3	3	16
1.4195	1.1	2	2	6	8
1.4107	0.1	7	3	4	16
1.4049	0.0	3	1	6	16
1.4038	9.0	6	1	5	16
1.4038	7.1	7	7	0	4
1.3936	0.0	9	4	1	16
1.3913	4.4	9	3	2	16
1.3897	11.9	6	8	0	8
1.3760	13.6	5	4	5	16
1.3690	0.0	8	0	4	8

1.3664	4.3	10	1	1	16
1.3638	0.1	0	4	6	8
1.3627	19.0	2	10	0	8
1.3508	1.5	3	3	6	8
1.3498	0.0	6	3	5	16
1.3498	1.6	5	9	0	8
1.3437	20.0	7	6	3	16
1.3432	0.0	8	2	4	16
1.3387	1.6	7	7	2	8
1.3382	21.9	4	2	6	16
1.3264	10.3	8	6	2	16
1.3192	17.8	8	5	3	16
1.3188	0.5	6	6	4	8
1.3164	1.6	10	3	1	16
1.3071	0.2	7	5	4	16
1.3029	8.8	10	2	2	16
1.3025	2.7	5	1	6	16
1.3016	0.6	7	2	5	16
1.2934	0.5	8	7	1	16
1.2916	0.0	9	5	2	16
1.2903	34.3	4	10	0	8
1.2741	4.1	9	4	3	16
1.2737	0.9	8	4	4	16
1.2715	0.0	9	6	1	16
1.2694	37.4	4	4	6	8
1.2631	0.3	9	1	4	16
1.2590	0.4	5	3	6	16
1.2582	3.5	6	5	5	16
1.2581	3.4	1	11	0	8
1.2532	1.0	10	1	3	16
1.2488	30.1	6	0	6	8
1.2452	0.0	2	1	7	16
1.2392	23.1	10	4	2	16
1.2380	12.5	7	4	5	16
1.2310	1.4	10	5	1	16
1.2291	12.9	6	2	6	16
1.2283	3.9	8	8	0	4
1.2233	0.1	9	3	4	16
1.2188	5.9	3	11	0	8
1.2143	2.8	10	3	3	16
1.2106	1.0	11	1	2	16
1.2070	1.6	3	2	7	16
1.2005	18.3	8	3	5	16
1.1962	5.3	8	7	3	16
1.1916	6.4	6	10	0	8
1.1892	4.2	4	1	7	16
1.1871	3.8	7	7	4	8
1.1840	3.9	8	8	2	8
1.1837	10.4	5	5	6	8
1.1789	2.6	9	6	3	16
1.1785	1.5	8	6	4	16
1.1768	0.0	11	4	1	16
1.1755	7.7	9	7	2	16
1.1752	0.1	6	4	6	16
1.1619	0.1	10	2	4	16
1.1580	6.9	12	0	0	4
1.1558	0.0	4	3	7	16
1.1539	0.4	9	5	4	16
1.1510	4.7	10	6	2	16
1.1507	2.0	7	3	6	16
1.1501	9.2	7	6	5	16
1.1501	6.0	5	11	0	8
1.1463	13.2	10	5	3	16
1.1445	9.0	9	8	1	16
1.1423	1.5	2	12	0	8
1.1402	2.0	5	2	7	16
1.1347	7.5	8	5	5	16
1.1292	0.7	10	7	1	16
1.1278	1.3	8	0	6	8
1.1207	5.1	12	0	2	8
1.1161	0.0	10	4	4	16
1.1146	0.0	12	3	1	16
1.1135	0.3	11	5	2	16

1.1132	0.1	8	2	6	16
1.1121	0.5	0	0	8	2
1.1106	0.6	6	1	7	16
1.1064	0.0	12	2	2	16
1.1056	0.2	9	4	5	16
1.1050	0.1	1	1	8	8
1.1022	0.1	11	4	3	16
1.1005	0.2	11	6	1	16
1.0992	12.0	6	6	6	8
1.0986	0.0	4	12	0	8
1.0981	1.0	0	2	8	8
1.0967	0.0	5	4	7	16
1.0951	0.0	11	1	4	16
1.0924	1.1	7	5	6	16
1.0918	4.3	10	1	5	16
1.0918	0.2	9	9	0	4
1.0851	1.0	8	10	0	8
1.0846	0.0	2	2	8	8
1.0833	0.1	6	3	7	16
1.0781	0.5	3	1	8	16
1.0755	17.5	9	8	3	16
1.0752	0.2	8	8	4	8
1.0727	2.2	8	4	6	16
1.0688	2.0	9	7	4	16
1.0666	0.7	12	4	2	16
1.0663	5.5	9	1	6	16
1.0658	1.5	10	3	5	16
1.0658	1.6	1	13	0	8
1.0628	0.1	10	7	3	16
1.0613	1.6	12	5	1	16
1.0603	0.1	9	9	2	8
1.0591	0.0	0	4	8	8
1.0579	1.1	7	2	7	16
1.0542	0.5	10	8	2	16
1.0535	1.7	8	7	5	16
1.0530	1.2	3	3	8	8
1.0506	1.3	12	3	3	16
1.0504	2.5	10	6	4	16
1.0492	0.2	13	2	1	16
1.0470	3.4	4	2	8	16
1.0421	1.1	9	3	6	16
1.0416	0.0	9	6	5	16
1.0416	0.8	3	13	0	8
1.0388	0.3	11	6	3	16
1.0365	0.2	11	7	2	16
1.0358	0.8	6	12	0	8
1.0342	0.2	6	5	7	16
1.0297	0.1	5	1	8	16

Diffraction pattern graphics



9. JCPDS 96-702-2028

Entry # 96-702-2028

Phase classification

Name	Calcium Carbonate
Formula	CCaO ₃
I/Ic	3,330000
Sample Name	7022027
Quality	C (calculated)

References

Publication

Bibliography	Tyutyunnik Alexander P., Slobodin Boris V., Samigullina Rina F., Verberck Bart, Tarakina Nadezda V., "K ₂ CaV ₂ O ₇ : a pyrovanadate with a new layered type of structure in the A ₂ BV ₂ O ₇ family.", Dalton transactions (Cambridge, England : 2003) 42(4) , 1057-1064 (2013)
--------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Origin of data

Source of entry	COD (Crystallography Open Database)
Link to orig. entry	7022027

Crystal structure

Crystallographic data

Space group	R - 3 c (167)						
Crystal system	trigonal (hexagonal axes)						
Cell parameters	a= 4.9915 Å c= 17.0880 Å						
Cell meas. conditions	T= 298.0 K						
Z	6						
Atom coordinates	Element	Oxid.	x	y	z	Bi	Focc
	Ca		0.000	0.000	0.000	1.973000	1.000000
	C		0.000	0.000	0.250	1.973000	1.000000
	O		0.257	0.000	0.250	1.973000	1.000000

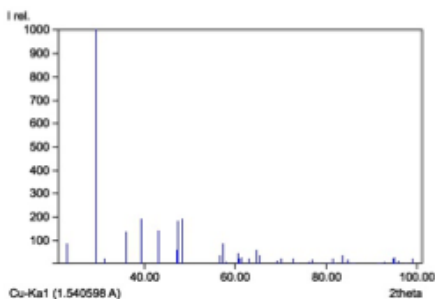
Diffraction data

Diffraction lines

d [Å]	Int.	h	k	l	Mult.
3.8572	83.2	0	1	2	6
3.0385	1000.0	1	0	4	6
2.8480	22.5	0	0	6	2
2.4957	135.1	1	1	0	6
2.2859	189.3	1	1	3	12
2.0954	139.6	2	0	2	6
1.9286	57.5	0	2	4	6
1.9150	183.4	0	1	8	6
1.8770	191.2	1	1	6	12
1.6264	32.9	2	1	1	12
1.6048	86.7	1	2	2	12
1.5891	7.7	1	0	10	6
1.5260	45.8	2	1	4	12
1.5193	21.1	2	0	8	6
1.5111	26.6	1	1	9	12
1.4741	19.5	1	2	5	12
1.4409	56.8	3	0	0	6
1.4240	32.7	0	0	12	2
1.3578	12.3	2	1	7	12
1.3405	19.0	0	2	10	6
1.2977	21.9	1	2	8	12
1.2857	4.0	0	3	6	6
1.2479	8.6	2	2	0	6
1.2368	15.6	1	1	12	12
1.2190	0.2	2	2	3	12
1.1960	0.0	1	3	1	12
1.1873	3.8	3	1	2	12
1.1809	19.4	2	1	10	12
1.1746	2.2	0	1	14	6

1.1543	35.2	1	3	4	12
1.1430	17.5	2	2	6	12
1.1313	0.0	3	1	5	12
1.1258	4.4	1	2	11	12
1.0761	0.0	1	3	7	12
1.0721	0.0	0	4	2	6
1.0628	6.3	2	0	14	6
1.0477	21.6	4	0	4	6
1.0455	23.1	3	1	8	12
1.0428	0.1	2	2	9	12
1.0368	10.6	1	0	16	6
1.0363	3.5	1	1	15	12
1.0242	2.8	2	1	13	12
1.0128	22.1	0	3	12	6

Diffraction pattern graphics



Experimental

Physical Properties

Calc. density 2.70500 g/cm³

Remarks

Remarks

Comments - Diffraction pattern calculated by Matchl.
- I/Ic calculated by Matchl.

10. JCPDS 96-901-2794

Entry # 96-901-2794

Phase classification

Name	
Mineral Name	Larnite
Formula	$\text{Ca}_2\text{O}_6\text{Si}$
I/Ic	0.770000
Sample Name	9012793
Quality	C (calculated)

References

Publication

Bibliography Tsurumi T., Hirano Y., Kato H., Kamiya T., Daimon M., "Crystal structure and hydration of beliteLocality: synthetic", Ceramic Transactions **40**, 19-25 (1994)

Origin of data

Source of entry [COD \(Crystallography Open Database\)](#)

Link to orig. entry [9012793](#)

Crystal structure

Crystallographic data

Space group P 1 2₁/n 1 (14)

Crystal system monoclinic

Cell parameters a= 5.5077 Å b= 6.7505 Å c= 9.3408 Å β= 94.596 °

Atom coordinates	Element	Oxid.	x	y	z	BI	Focc
	Ca		0.228	0.342	0.429	1.000000	1.000000
	Ca		0.226	0.004	-0.298	1.000000	1.000000
	Si		0.268	-0.215	0.417	1.000000	1.000000
	O		0.212	0.007	0.445	1.000000	1.000000
	O		0.012	-0.313	0.362	1.000000	1.000000
	O		0.478	-0.246	0.309	1.000000	1.000000
	O		0.349	-0.310	-0.430	1.000000	1.000000

Diffraction data

Diffraction lines

d [Å]	Int.	h	k	l	Mult.
5.4652	17.8	0	1	1	4
4.9042	31.3	1	0	-1	2
4.6554	100.3	0	0	2	2
4.5716	0.0	1	0	1	2
4.2582	6.6	1	1	0	4
3.9677	2.7	1	1	-1	4
3.8324	77.2	0	1	2	4
3.7852	39.2	1	1	1	4
3.3753	118.8	0	2	0	2
3.2445	140.7	-1	1	2	4
3.1732	127.4	0	2	1	4
3.0495	134.8	1	1	2	4
2.8753	296.2	1	2	0	4
2.8198	142.8	0	1	3	4
2.7996	1000.0	-1	0	3	2
2.7804	817.2	-1	2	1	4
2.7450	892.5	2	0	0	2
2.7326	288.1	0	2	2	4
2.7154	328.9	1	2	1	4
2.6135	697.4	1	0	3	2
2.5860	11.6	-1	1	3	4
2.5428	170.0	2	1	0	4
2.5006	1.2	2	1	-1	4
2.4936	16.0	-1	2	2	4
2.4521	155.8	2	0	-2	2
2.4372	69.7	1	1	3	4
2.4080	108.7	2	1	1	4

2.4017	194.0	1	2	2	4
2.3277	27.6	0	0	4	2
2.3047	29.5	2	1	-2	4
2.2858	27.3	2	0	2	2
2.2846	286.3	0	2	3	4
2.2005	211.9	0	1	4	4
2.1872	481.3	0	3	1	4
2.1650	193.5	2	1	2	4
2.1548	15.0	-1	2	3	4
2.1296	105.3	2	2	0	4
2.1046	27.0	2	2	-1	4
2.0982	86.4	-1	1	4	4
2.0821	49.5	1	3	0	4
2.0664	0.0	1	2	3	4
2.0485	163.1	2	2	1	4
2.0452	45.7	-1	3	1	4
2.0427	85.0	-2	1	3	4
2.0259	90.1	0	3	2	4
2.0189	135.1	1	3	1	4
1.9911	170.2	1	1	4	4
1.9838	310.2	2	2	-2	4
1.9225	0.1	-1	3	2	4
1.9162	118.8	0	2	4	4
1.8990	70.5	2	1	3	4
1.8926	152.2	2	2	2	4
1.8795	6.8	1	3	2	4
1.8500	58.5	-2	0	4	2
1.8475	6.3	-1	2	4	4
1.8235	3.7	3	0	-1	2
1.8217	26.4	0	3	3	4
1.8092	108.4	-2	2	3	4
1.8081	77.2	-1	0	5	2
1.7951	131.4	0	1	5	4
1.7842	0.1	-2	1	4	4
1.7731	9.0	1	2	4	4
1.7690	0.4	3	0	1	2
1.7662	33.4	3	1	0	4
1.7604	11.7	3	1	-1	4
1.7539	5.3	-1	3	3	4
1.7465	11.4	-1	1	5	4
1.7402	4.6	2	3	0	4
1.7265	78.7	2	3	-1	4
1.7220	28.5	1	0	5	2
1.7112	5.1	3	1	1	4
1.7091	22.9	2	0	4	2
1.7072	139.3	2	2	3	4
1.7052	5.8	1	3	3	4
1.6954	6.2	3	1	-2	4
1.6951	46.2	2	3	1	4
1.6876	68.3	0	4	0	2
1.6686	0.1	1	1	5	4
1.6606	10.7	0	4	1	4
1.6579	3.5	2	3	-2	4
1.6568	2.7	2	1	4	4
1.6347	195.8	3	0	-3	2
1.6305	87.0	0	2	5	4
1.6223	28.9	-2	2	4	4
1.6178	2.8	0	3	4	4
1.6131	66.3	1	4	0	4
1.6106	42.6	3	1	2	4
1.6088	70.5	3	2	0	4
1.6043	151.7	3	2	-1	4
1.6035	0.9	2	3	2	4
1.5958	25.1	-1	4	1	4
1.5938	18.8	-1	2	5	4
1.5888	16.2	3	1	-3	4
1.5866	47.8	0	4	2	4
1.5832	48.3	1	4	1	4
1.5758	156.4	-1	3	4	4
1.5669	9.8	3	2	1	4
1.5585	44.0	-2	1	5	4
1.5547	44.7	3	2	-2	4
1.5519	33.5	-2	3	3	4

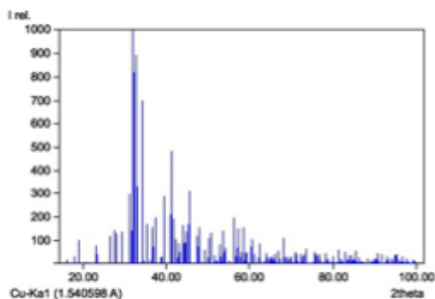
1.5518	47.6	0	0	6	2
1.5354	0.1	-1	4	2	4
1.5339	2.5	1	2	5	4
1.5289	72.8	1	3	4	4
1.5247	9.1	2	2	4	4
1.5239	103.2	3	0	3	2
1.5132	40.1	1	4	2	4
1.5123	10.5	0	1	6	4
1.4885	7.9	3	2	2	4
1.4881	24.5	-1	1	6	4
1.4864	12.3	3	1	3	4
1.4860	43.9	2	3	3	4
1.4826	84.6	0	4	3	4
1.4712	1.0	3	2	-3	4
1.4626	10.7	-3	1	4	4
1.4519	43.8	2	1	5	4
1.4471	26.5	-2	2	5	4
1.4453	6.9	-1	4	3	4
1.4377	17.3	2	4	0	4
1.4346	5.3	0	3	5	4
1.4299	5.4	2	4	-1	4
1.4297	25.8	1	1	6	4
1.4290	30.6	-2	3	4	4
1.4197	10.6	3	3	0	4
1.4177	21.4	1	4	3	4
1.4167	15.1	3	3	-1	4
1.4119	37.1	2	4	1	4
1.4099	29.5	0	2	6	4
1.4094	7.8	-1	3	5	4
1.3998	52.8	-2	0	6	2
1.3907	4.5	3	3	1	4
1.3902	16.9	-1	2	6	4
1.3902	20.6	-2	4	2	4
1.3889	5.7	3	2	3	4
1.3822	0.0	3	3	-2	4
1.3725	106.6	4	0	0	2
1.3706	23.9	-2	1	6	4
1.3693	5.7	-3	2	4	4
1.3675	9.0	1	3	5	4
1.3663	3.3	0	4	4	4
1.3610	31.7	2	3	4	4
1.3609	3.1	-3	0	5	2
1.3605	5.3	2	2	5	4
1.3577	0.6	2	4	2	4
1.3574	16.6	3	1	4	4
1.3462	5.4	4	1	-1	4
1.3461	0.1	4	0	-2	2
1.3450	18.7	4	1	0	4
1.3423	31.9	1	2	6	4
1.3407	2.0	-1	4	4	4
1.3361	5.5	0	5	1	4
1.3350	0.0	3	3	2	4
1.3340	0.6	-3	1	5	4
1.3259	48.5	-2	4	3	4
1.3226	0.0	3	3	-3	4
1.3201	38.2	4	1	-2	4
1.3171	11.8	-1	0	7	2
1.3166	12.2	4	1	1	4
1.3115	2.5	1	4	4	4
1.3110	0.0	1	5	0	4
1.3068	38.8	2	0	6	2
1.3050	10.3	0	1	7	4
1.3049	38.4	-2	3	5	4
1.3017	8.4	-1	5	1	4
1.2967	31.5	0	5	2	4
1.2948	37.5	1	5	1	4
1.2930	30.8	-2	2	6	4
1.2927	1.7	-1	1	7	4
1.2888	0.5	4	0	2	2
1.2841	62.6	2	4	3	4
1.2829	0.9	2	1	6	4
1.2819	2.4	3	2	4	4
1.2775	0.3	0	3	6	4

1.2724	0.5	4	2	-1	4
1.2714	1.1	4	2	0	4
1.2710	2.7	4	1	-3	4
1.2696	0.5	1	0	7	2
1.2683	0.3	-1	5	2	4
1.2659	0.0	4	1	2	4
1.2628	4.9	-1	3	6	4
1.2621	3.0	-3	2	5	4
1.2617	1.4	3	3	3	4
1.2559	50.4	3	0	5	2
1.2557	1.0	1	5	2	4
1.2505	37.6	0	4	5	4
1.2503	15.6	4	2	-2	4
1.2478	1.3	1	1	7	4
1.2474	9.6	4	2	1	4
1.2470	30.4	-3	3	4	4
1.2468	4.6	-2	4	4	4
1.2406	38.4	3	4	0	4
1.2404	0.9	2	3	5	4
1.2386	15.5	3	4	-1	4
1.2380	5.0	0	5	3	4
1.2375	0.1	0	2	7	4
1.2347	0.6	3	1	5	4
1.2337	0.0	-1	4	5	4
1.2270	7.7	-1	2	7	4
1.2265	1.3	1	3	6	4
1.2260	3.6	4	0	-4	2
1.2211	13.3	3	4	1	4
1.2186	44.2	2	2	6	4
1.2163	4.5	-2	1	7	4
1.2161	1.6	-1	5	3	4
1.2153	11.7	3	4	-2	4
1.2132	20.9	-3	1	6	4
1.2115	0.2	2	5	0	4
1.2084	6.3	4	2	-3	4
1.2068	3.3	2	5	-1	4
1.2063	6.4	4	1	-4	4
1.2053	0.2	1	4	5	4
1.2040	3.9	4	2	2	4
1.2008	0.0	2	4	4	4
1.2002	7.7	4	1	3	4
1.1995	0.4	1	5	3	4
1.1960	31.6	2	5	1	4
1.1886	1.0	-2	3	6	4
1.1883	7.1	1	2	7	4
1.1829	4.5	3	4	2	4
1.1827	7.6	-2	5	2	4
1.1799	55.9	3	3	4	4
1.1770	7.6	3	2	5	4
1.1742	20.5	3	4	-3	4
1.1725	5.6	4	3	-1	4
1.1717	0.0	4	3	0	4
1.1679	10.8	0	5	4	4
1.1645	3.3	-3	3	5	4
1.1638	47.2	0	0	8	2
1.1625	20.5	2	5	2	4
1.1618	9.4	-2	4	5	4
1.1610	0.6	-2	2	7	4
1.1584	18.4	-3	2	6	4
1.1551	17.3	4	3	-2	4
1.1528	10.6	4	3	1	4
1.1524	35.6	4	2	-4	4
1.1518	26.2	-1	5	4	4
1.1470	8.7	4	2	3	4
1.1469	0.1	0	1	8	4
1.1450	34.0	0	3	7	4
1.1442	2.3	2	1	7	4
1.1429	12.9	4	0	4	2
1.1423	14.6	-2	5	3	4
1.1423	1.8	0	4	6	4
1.1409	13.7	-1	1	8	4
1.1367	15.5	-1	3	7	4

1.1334	7.8	-4	1	5	4
1.1331	53.2	1	5	4	4
1.1317	8.3	-1	4	6	4
1.1310	0.1	3	4	3	4
1.1300	0.0	2	3	6	4
1.1269	0.1	4	1	4	4
1.1251	27.1	0	6	0	2
1.1235	6.0	3	1	6	4
1.1219	6.6	4	3	-3	4
1.1204	5.0	-3	4	4	4
1.1194	0.1	-3	0	7	2
1.1183	5.0	4	3	2	4
1.1170	1.2	0	6	1	4
1.1156	3.6	2	4	5	4
1.1153	5.4	2	5	3	4
1.1058	4.7	1	3	7	4
1.1054	16.6	1	4	6	4
1.1054	3.6	1	1	8	4
1.1044	5.2	-3	1	7	4
1.1038	22.8	-2	0	8	2
1.1022	0.0	1	6	0	4
1.1007	0.9	5	0	-1	2
1.1003	0.0	0	2	8	4
1.0979	3.4	2	2	7	4
1.0966	5.2	3	3	5	4
1.0966	10.9	-1	6	1	4
1.0949	8.7	-1	2	8	4
1.0936	0.4	0	6	2	4
1.0930	7.1	0	5	5	4
1.0925	0.6	1	6	1	4
1.0906	19.3	-2	5	4	4
1.0893	11.4	-2	1	8	4
1.0883	12.5	-4	2	5	4
1.0864	7.7	3	5	0	4
1.0864	3.7	5	1	-1	4
1.0851	21.8	3	5	-1	4
1.0838	1.8	5	1	0	4
1.0837	42.3	-2	3	7	4
1.0825	0.0	4	2	4	4
1.0818	5.0	-1	5	5	4
1.0815	0.5	-3	3	6	4
1.0804	6.7	5	0	1	2
1.0795	10.2	3	2	6	4
1.0774	0.7	-2	4	6	4
1.0766	1.0	4	3	-4	4
1.0764	1.0	-1	6	2	4
1.0745	0.1	5	1	-2	4
1.0732	3.1	3	5	1	4
1.0722	40.4	4	3	3	4
1.0716	2.3	-4	0	6	2
1.0709	0.7	3	4	4	4
1.0693	0.8	3	5	-2	4
1.0687	3.0	1	6	2	4
1.0668	0.7	5	1	1	4
1.0654	0.5	4	4	-1	4
1.0648	11.3	4	4	0	4
1.0634	4.6	1	2	8	4
1.0625	2.4	-3	2	7	4
1.0625	12.4	1	5	5	4
1.0622	29.9	5	0	-3	2
1.0594	15.4	2	5	4	4
1.0594	10.4	-3	4	5	4
1.0583	12.6	-4	1	6	4
1.0577	1.2	0	6	3	4
1.0523	18.6	4	4	-2	4
1.0518	11.5	4	1	5	4
1.0506	3.2	4	4	1	4
1.0493	12.5	5	1	-3	4
1.0491	0.1	-2	2	8	4
1.0470	0.9	3	5	2	4
1.0465	34.0	5	2	-1	4
1.0446	0.3	0	4	7	4

1.0439	35.5	-1	6	3	4
1.0419	28.1	2	0	8	2
1.0410	38.7	2	6	0	4
1.0410	1.6	-3	5	3	4
1.0383	3.9	-1	4	7	4
1.0381	3.1	2	6	-1	4
1.0376	14.8	5	1	2	4
1.0371	11.2	3	0	7	2
1.0358	6.5	5	2	-2	4
1.0338	1.9	0	3	8	4
1.0334	7.9	1	6	3	4
1.0332	1.1	2	4	6	4
1.0323	0.4	-2	5	5	4
1.0318	1.3	-1	0	9	2
1.0318	29.6	2	3	7	4
1.0311	1.3	2	6	1	4
1.0297	0.6	2	1	8	4
1.0293	6.2	-1	3	8	4
1.0290	7.2	5	2	1	4
1.0270	6.0	4	4	-3	4
1.0251	0.2	3	1	7	4
1.0243	1.1	4	4	2	4
1.0238	21.5	-4	3	5	4
1.0226	2.6	0	1	9	4
1.0226	0.1	-2	6	2	4
1.0213	0.0	-4	2	6	4
1.0199	8.1	-1	1	9	4
1.0190	4.2	4	3	4	4
1.0186	6.7	0	5	6	4
1.0165	3.2	3	3	6	4
1.0155	2.3	4	2	5	4
1.0146	1.6	1	4	7	4
1.0136	0.1	5	1	-4	4
1.0132	0.0	5	2	-3	4
1.0130	0.0	0	6	4	4
1.0111	2.3	-1	5	6	4
1.0105	0.8	3	5	3	4
1.0100	15.3	5	0	3	2
1.0094	3.1	2	6	2	4
1.0083	9.7	-3	1	8	4
1.0075	6.9	3	4	5	4

Diffraction pattern graphics



Experimental

Physical Properties

Calc. density 3.30500 g/cm³

11. JCPDS 96-901-3427

Entry # 96-901-3427

Phase classification

Name	
Mineral Name	Cristoballite
Formula	O ₂ Si
I/Ic	1.150000
Sample Name	9013426
Quality	C (calculated)

References

Publication

Bibliography	Dove M. T., Craig M. S., Keen D. A., Marshall W. G., Redfern S. A. T., Trachenko K. O., Tucker M. G., "Crystal structure of the high-pressure monoclinic phase-II of cristoballite, SiO ₂ Locality: synthetic Note: P = 3.5 GPa, refinement by unconstrained Rietveld analysis", Mineralogical Magazine 64 , 569-576 (2000)
--------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Origin of data

Source of entry	COD (Crystallography Open Database)
Link to orig. entry	9013426

Crystal structure

Crystallographic data

Space group	P 1 21/c 1 (14)																																																	
Crystal system	monoclinic																																																	
Cell parameters	a= 8.3780 Å b= 4.6018 Å c= 9.0568 Å β= 124.949 °																																																	
Cell meas. conditions	p= 3.5 kPa																																																	
Atom coordinates	<table><tr><th>Element</th><th>Oxid.</th><th>x</th><th>y</th><th>z</th><th>BI</th><th>Focc</th></tr><tr><td>Si</td><td></td><td>0.373</td><td>0.734</td><td>0.219</td><td>1.000000</td><td>1.000000</td></tr><tr><td>Si</td><td></td><td>0.134</td><td>0.978</td><td>0.853</td><td>1.000000</td><td>1.000000</td></tr><tr><td>O</td><td></td><td>0.185</td><td>0.875</td><td>0.036</td><td>0.221000</td><td>1.000000</td></tr><tr><td>O</td><td></td><td>0.306</td><td>0.595</td><td>0.333</td><td>0.221000</td><td>1.000000</td></tr><tr><td>O</td><td></td><td>0.536</td><td>0.974</td><td>0.332</td><td>0.221000</td><td>1.000000</td></tr><tr><td>O</td><td></td><td>0.930</td><td>0.805</td><td>0.691</td><td>0.221000</td><td>1.000000</td></tr></table>	Element	Oxid.	x	y	z	BI	Focc	Si		0.373	0.734	0.219	1.000000	1.000000	Si		0.134	0.978	0.853	1.000000	1.000000	O		0.185	0.875	0.036	0.221000	1.000000	O		0.306	0.595	0.333	0.221000	1.000000	O		0.536	0.974	0.332	0.221000	1.000000	O		0.930	0.805	0.691	0.221000	1.000000
Element	Oxid.	x	y	z	BI	Focc																																												
Si		0.373	0.734	0.219	1.000000	1.000000																																												
Si		0.134	0.978	0.853	1.000000	1.000000																																												
O		0.185	0.875	0.036	0.221000	1.000000																																												
O		0.306	0.595	0.333	0.221000	1.000000																																												
O		0.536	0.974	0.332	0.221000	1.000000																																												
O		0.930	0.805	0.691	0.221000	1.000000																																												

Diffraction data

Diffraction lines

d [Å]	Int.	h	k	l	Mult.
6.8671	1.6	1	0	0	2
4.5249	1.4	-1	0	2	2
3.9498	50.7	1	1	-1	4
3.9113	401.4	0	1	1	4
3.8487	1000.0	2	0	-2	2
3.8228	793.0	1	1	0	4
3.7118	670.0	0	0	2	2
3.4336	1.4	2	0	0	2
3.2264	95.3	-1	1	2	4
3.0825	172.9	2	1	-1	4
3.0283	741.6	1	1	1	4
2.9523	389.9	2	1	-2	4
2.8891	42.5	0	1	2	4
2.7887	162.7	3	0	-2	2
2.7519	247.2	2	1	0	4
2.6847	174.5	1	0	2	2
2.4960	46.4	-2	1	3	4
2.4669	74.8	-1	1	3	4
2.3849	16.8	3	1	-2	4
2.3189	0.6	1	1	2	4
2.3015	95.1	3	1	-1	4
2.3009	4.6	0	2	0	2
2.2890	9.4	3	0	0	2
2.2638	71.3	2	1	1	4
2.2624	153.8	-2	0	4	2

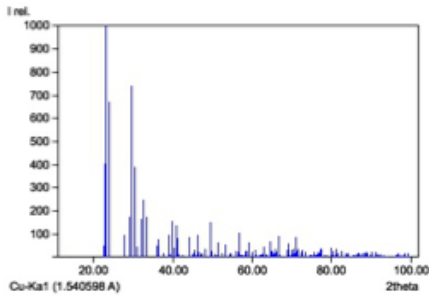
2.2410	39.1	3	1	-3	4
2.2045	135.1	-1	2	1	4
2.1978	78.9	0	2	1	4
2.1817	8.1	1	2	0	4
2.1794	6.7	0	1	3	4
2.1744	11.0	-3	0	4	2
2.1241	6.2	-1	0	4	2
2.0758	3.0	4	0	-2	2
2.0510	86.0	-1	2	2	4
2.0495	1.2	3	1	0	4
2.0303	0.7	-2	1	4	4
2.0125	5.2	2	2	-1	4
2.0109	18.2	2	0	2	2
1.9972	28.7	1	2	1	4
1.9749	8.4	2	2	-2	4
1.9660	92.4	-3	1	4	4
1.9556	20.0	0	2	2	4
1.9286	12.7	-1	1	4	4
1.9244	14.3	4	0	-4	2
1.9114	0.1	2	2	0	4
1.8922	2.3	4	1	-2	4
1.8894	33.5	4	1	-3	4
1.8559	2.1	0	0	4	2
1.8426	151.9	2	1	2	4
1.8283	26.7	1	1	3	4
1.8191	3.0	-2	2	3	4
1.8078	10.5	-1	2	3	4
1.7824	9.1	4	1	-1	4
1.7754	60.6	4	1	-4	4
1.7748	37.9	3	2	-2	4
1.7578	0.0	3	1	1	4
1.7471	18.1	1	2	2	4
1.7396	14.6	3	2	-1	4
1.7231	18.7	2	2	1	4
1.7212	9.2	0	1	4	4
1.7168	53.8	4	0	0	2
1.7130	3.3	3	2	-3	4
1.6850	10.9	0	2	3	4
1.6793	16.9	-3	1	5	4
1.6645	1.0	-2	1	5	4
1.6418	27.1	5	0	-4	2
1.6265	22.2	5	0	-2	2
1.6228	103.6	3	2	0	4
1.6132	6.2	-2	2	4	4
1.6085	6.6	4	1	0	4
1.5999	8.2	-4	1	5	4
1.5846	9.2	3	0	2	2
1.5804	1.9	-3	2	4	4
1.5783	26.4	1	0	4	2
1.5741	24.7	5	1	-3	4
1.5623	62.8	-1	1	5	4
1.5607	22.6	-1	2	4	4
1.5463	1.8	5	1	-4	4
1.5413	21.1	4	2	-2	4
1.5397	18.1	4	2	-3	4
1.5336	3.8	5	1	-2	4
1.5246	31.3	2	1	3	4
1.5141	4.9	2	2	2	4
1.5083	1.6	-3	0	6	2
1.5061	1.8	1	2	3	4
1.5044	0.0	-1	3	1	4
1.5022	0.4	0	3	1	4
1.4982	0.5	3	1	2	4
1.4970	4.9	1	3	0	4
1.4929	6.6	1	1	4	4
1.4855	11.6	-4	0	6	2
1.4802	11.4	4	2	-1	4
1.4761	41.6	4	2	-4	4
1.4660	9.3	3	2	1	4
1.4612	0.1	-2	0	6	2
1.4600	6.9	5	1	-5	4
1.4527	2.0	-1	3	2	4
1.4445	68.5	0	2	4	4

1.4389	26.3	2	3	-1	4
1.4387	4.4	5	1	-1	4
1.4333	21.9	-3	1	6	4
1.4332	24.9	1	3	1	4
1.4249	11.6	2	3	-2	4
1.4220	15.9	4	1	1	4
1.4195	1.6	-3	2	5	4
1.4176	36.0	0	3	2	4
1.4137	20.1	-4	1	6	4
1.4130	1.2	0	1	5	4
1.4105	19.7	-2	2	5	4
1.4014	90.5	-5	0	6	2
1.4005	45.1	2	3	0	4
1.3943	6.2	6	0	-4	2
1.3926	0.8	-2	1	6	4
1.3760	3.0	4	2	0	4
1.3734	1.1	5	0	0	2
1.3706	3.5	-4	2	5	4
1.3630	0.9	-2	3	3	4
1.3613	27.8	-1	0	6	2
1.3582	57.2	-1	3	3	4
1.3543	7.2	5	2	-3	4
1.3467	0.2	-1	2	5	4
1.3440	9.4	3	3	-2	4
1.3424	27.8	2	0	4	2
1.3406	10.4	-5	1	6	4
1.3365	35.0	5	2	-4	4
1.3344	1.4	6	1	-4	4
1.3319	9.2	1	3	2	4
1.3289	16.7	6	0	-2	2
1.3285	9.1	3	3	-1	4
1.3282	85.2	5	2	-2	4
1.3252	0.4	6	1	-3	4
1.3224	0.1	2	2	3	4
1.3212	27.3	2	3	1	4
1.3166	2.2	3	3	-3	4
1.3161	32.4	5	1	0	4
1.3054	0.1	-1	1	6	4
1.3050	22.4	3	2	2	4
1.3038	17.1	0	3	3	4
1.3018	20.7	6	1	-5	4
1.3015	5.3	1	2	4	4
1.3001	28.1	4	0	2	2
1.2887	18.6	2	1	4	4
1.2871	0.3	3	1	3	4
1.2829	3.4	6	0	-6	2
1.2795	3.5	5	2	-5	4
1.2767	0.3	6	1	-2	4
1.2743	5.4	3	3	0	4
1.2696	7.7	-2	3	4	4
1.2651	7.0	5	2	-1	4
1.2614	2.9	-3	2	6	4
1.2555	18.7	1	1	5	4
1.2537	0.6	4	2	1	4
1.2534	8.4	-3	3	4	4
1.2511	3.9	4	1	2	4
1.2480	5.0	-4	2	6	4
1.2475	9.9	0	2	5	4
1.2438	19.2	-4	1	7	4
1.2436	1.8	-1	3	4	4
1.2373	15.6	0	0	6	2
1.2358	6.8	6	1	-6	4
1.2354	3.2	-3	1	7	4
1.2336	18.1	4	3	-2	4
1.2335	34.8	-2	2	6	4
1.2329	34.8	4	3	-3	4
1.2196	7.2	2	3	2	4
1.2154	6.3	1	3	3	4
1.2128	6.2	-5	1	7	4
1.2017	2.2	4	3	-1	4
1.2005	39.3	6	1	-1	4
1.1995	0.9	4	3	-4	4

1.1969	0.0	-5	2	6	4
1.1951	5.5	7	0	-4	2
1.1948	27.2	0	1	6	4
1.1940	7.5	3	3	1	4
1.1925	0.1	6	2	-4	4
1.1897	0.3	-2	1	7	4
1.1886	3.7	5	1	1	4
1.1859	7.2	6	2	-3	4
1.1823	36.2	0	3	4	4
1.1793	14.4	5	2	0	4
1.1716	2.4	-1	2	6	4
1.1690	3.8	6	2	-5	4
1.1685	26.3	-3	3	5	4
1.1635	4.2	-2	3	5	4
1.1595	1.2	2	2	4	4
1.1583	1.1	3	2	3	4
1.1567	16.8	7	1	-4	4
1.1559	1.5	7	0	-6	2
1.1540	6.5	3	0	4	2
1.1521	5.3	7	1	-5	4
1.1507	0.0	6	2	-2	4
1.1504	8.5	0	4	0	2
1.1502	18.1	-6	1	7	4
1.1445	2.1	6	0	0	2
1.1439	1.2	4	3	0	4
1.1408	2.1	-4	3	5	4
1.1378	4.1	-1	4	1	4
1.1369	1.1	0	4	1	4
1.1351	6.2	1	2	5	4
1.1346	1.4	1	4	0	4
1.1340	8.8	7	1	-3	4
1.1319	5.5	4	2	2	4
1.1313	4.4	5	3	-3	4
1.1312	8.5	-4	0	8	2
1.1269	5.8	-1	3	5	4
1.1265	0.0	-4	2	7	4
1.1233	17.0	-5	0	8	2
1.1211	15.6	7	1	-6	4
1.1208	6.3	5	3	-4	4
1.1205	4.6	6	2	-6	4
1.1202	6.8	-3	2	7	4
1.1201	3.2	7	0	-2	2
1.1194	1.2	3	1	4	4
1.1179	2.8	-1	1	7	4
1.1160	13.4	5	3	-2	4
1.1150	0.1	-1	4	2	4
1.1125	1.4	2	3	3	4
1.1116	3.6	1	0	6	2
1.1108	14.4	2	1	5	4
1.1107	3.7	6	1	0	4
1.1092	5.4	-3	0	8	2
1.1087	4.5	2	4	-1	4
1.1061	0.0	1	4	1	4
1.1046	10.8	4	1	3	4
1.1033	14.2	-5	2	7	4
1.1023	20.7	-2	4	2	4
1.1021	0.1	3	3	2	4
1.1000	8.4	1	3	4	4
1.0993	0.2	5	0	2	2
1.0989	17.9	0	4	2	4
1.0985	3.6	-4	1	8	4
1.0940	0.2	6	2	-1	4
1.0913	1.3	-5	1	8	4
1.0908	4.8	2	4	0	4
1.0897	15.1	0	2	6	4
1.0883	21.0	7	1	-2	4
1.0872	0.6	-6	0	8	2
1.0866	0.9	5	3	-5	4
1.0858	0.2	-2	2	7	4
1.0849	0.8	5	2	1	4
1.0805	0.2	1	1	6	4
1.0783	18.6	-3	1	8	4
1.0778	2.8	5	3	-1	4

1.0755	12.9	-3	3	6	4
1.0728	1.4	-2	4	3	4
1.0707	6.5	4	3	1	4
1.0705	2.7	-1	4	3	4
1.0695	2.2	7	1	-7	4
1.0692	13.6	5	1	2	4
1.0671	0.0	-4	3	6	4
1.0668	0.1	0	3	5	4
1.0635	0.0	3	4	-2	4
1.0620	0.2	-2	0	8	2
1.0606	9.0	7	2	-4	4
1.0581	0.1	-6	1	8	4
1.0580	0.4	-2	3	6	4
1.0575	2.1	1	4	2	4
1.0570	0.2	7	2	-5	4
1.0558	0.3	3	4	-1	4
1.0555	3.9	-6	2	7	4
1.0521	2.9	2	4	1	4
1.0498	0.0	3	4	-3	4
1.0432	3.3	0	4	3	4
1.0430	0.5	7	2	-3	4
1.0379	1.2	8	0	-4	2
1.0360	0.2	8	0	-6	2
1.0348	1.5	-2	1	8	4
1.0346	1.0	-5	3	6	4
1.0334	7.7	0	1	7	4
1.0329	6.9	7	2	-6	4
1.0318	1.4	6	3	-4	4
1.0316	0.1	3	2	4	4
1.0304	14.6	-7	0	8	2
1.0304	2.0	-1	2	7	4
1.0279	0.1	3	4	0	4
1.0275	1.2	7	1	-1	4
1.0275	0.0	6	3	-3	4
1.0255	8.6	-2	4	4	4
1.0248	0.6	2	2	5	4
1.0247	2.9	6	2	0	4
1.0232	0.1	5	3	0	4
1.0211	0.0	8	1	-5	4
1.0200	5.4	4	2	3	4
1.0187	4.6	6	1	1	4
1.0182	0.2	-1	3	6	4
1.0169	14.2	-3	4	4	4
1.0165	14.5	6	3	-5	4
1.0152	4.3	-4	2	8	4
1.0125	1.7	8	1	-4	4
1.0116	16.7	-1	4	4	4
1.0107	0.0	8	1	-6	4
1.0102	0.9	2	3	4	4
1.0094	0.1	-5	2	8	4
1.0094	2.1	3	3	3	4
1.0071	0.9	7	2	-2	4

Diffraction pattern graphics



Experimental

Physical Properties

Calc. density 2.78900 g/cm³

Remarks

Remarks

Comments - Diffraction pattern calculated by Match!.
- I/Ic calculated by Match!.

12. Perhitungan Ukuran Butir

Metode Jeffries:

$$N_A = f \left(N_{inside} + \frac{N_{intercept}}{2} \right)$$

$$A \text{ (mm}^2\text{)} = \frac{1}{N_A}$$

$$d \text{ (mm)} = \frac{1}{\sqrt{N_A}}$$

Dimana:

N_A = Grains/Unit Area

A = Average Grain Area (mm²)

d = Average Grain Diameter (mm)

A. *Cross Section* daerah tidak mengamai deofrmasi

$$N_A = 8 \left(64 + \frac{41}{2} \right) = 676$$

$$A \text{ (mm}^2\text{)} = \frac{1}{676} = 0.001479$$

$$d \text{ (mm)} = \frac{1}{\sqrt{676}} = 0.0384$$

B. *Cross Section* daerah yang terdeformasi

$$N_A = 8 \left(50 + \frac{85}{2} \right) = 740$$

$$A \text{ (mm}^2\text{)} = \frac{1}{740} = 0.00135135$$

$$d \text{ (mm)} = \frac{1}{\sqrt{740}} = 0.0367$$

Didapatkan nilai luas dan diameter butir pada daerah terdeformasi lebih kecil dibandingkan daerah tidak terdeformasi.

13. Perhitungan Nilai *Microstrain Broadening*

<i>Raw Material Water Injection</i>			
2θ	θ	B	ε
43.3426	21.6713	0.1020	0.0641
50.5332	25.2666	0.1428	0.0756
74.4265	37.2128	0.0816	0.0268

<i>Fail Material Water Injection</i>			
2θ	θ	B	ε
43.4265	21.71325	0.1171	0.0735
50.5804	25.2902	0.1673	0.0885
74.5429	37.27145	0.2676	0.0879

Contoh perhitungan:

$$B = 4\varepsilon \frac{\sin \theta}{\cos \theta}$$

$$0.1020 = 4\varepsilon \frac{\sin(21.6713)}{\cos(21.6713)}$$

$$\varepsilon = 0.00641$$

Didapatkan nilai *microstrain broadening* pada *fail material water injection* lebih besar dibandingkan *raw material water injection*.

UCAPAN TERIMA KASIH

Pada pengerjaan tugas akhir ini penulis banyak mendapat bantuan dari berbagai pihak, pada kesempatan ini penulis mengucapkan banyak terima kasih kepada:

1. Ayah, Ibu, Kakak, dan Adik-adik tercinta, Bapak Andi Batarsyah, Ibu Nurhasiah, Aldi Syaputra, Abiel Wira Pramana, Dessy Kirana Amanda, Wulandari Yulian, dan Pretty Nola serta seluruh keluarga yang telah memberikan banyak doa, dukungan, semangat, cinta kasih, motivasi, dan inspirasi.
2. Dr. Agung Purniawan, ST, M,Eng dan Alvian Toto Wibisono ST., MT. selaku dosen pembimbing Tugas Akhir penulis yang telah membimbing dan memberikan banyak ilmu selama pengerjaan tugas akhir ini.
3. Mas Essa Abubakar selaku pembimbing dari PT. Holcim Tuban Plant Indonesia yang telah membimbing dan memberikan banyak ilmu selama pengerjaan tugas akhir ini.
4. Dr. Agung Purniawan, ST., M,Eng selaku Ketua Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI – ITS.
5. Dr. Eng. Hosta Ardhyanta ST., M.Sc. selaku Koordinator Tugas Akhir Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS.
6. Amaliya Rasyida ST., M.Sc. selaku dosen wali yang sangat mengayomi selama penulis menjalani pendidikan di Jurusan Teknik Material dan Metalurgi.
7. Seluruh dosen dan karyawan Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS yang telah membimbing penulis hingga terciptanya laporan ini.
8. Sahabat terbaik penulis yaitu Para Sayap yang beranggotakan Gentong, Aul, Dio, Dony, Gale, Daru, Ridho, Kemplo, Panji, Didit, Reggy, Ikiw, dan Yudha yang telah memberikan semangat dan energi positif selama penulis menjadi mahasiswa di JTMM FTI-ITS.

9. Sahabat terbaik penulis, Annisa Riyanti dan M. Rifqi Mahendra yang selalu ada untuk berbagi suka dan duka selama penulis menjadi mahasiswa di JTMM FTI-ITS.
10. Geng Batu Merah (Rio, Putika, Pipin) yang selalu menjadi sahabat kecil terbaik bagi penulis.
11. Qory dan Ican yang selalu memberikan tawa dan ceria selama penulis mengerjakan laporan ini.
12. Sahabat seperantauan terbaik, Ridho, Angga, dan Anthony.
13. Winata Fika, sahabat terbaik untuk jalan-jalan dan cerita banyak hal.
14. Daru, Mas Yogi, Bang Dika, Mas Acad, teman-teman satu tim tugas akhir di PT. Holcim Tuban Plant Indonesia yang telah memberikan bantuan, semangat, dan cerita selama pengerjaan tugas akhir ini.
15. Grader Metalurgi 16/17 yang memberikan semangat dan ilmu kepada penulis.
16. Majdi, Qory, Dhani, Epi, Yogi, Ican, Mail, Ici, dll sebagai tim PSDM SC yang super hebat dan selalu memberikan semangat serta tempat untuk berbagi suka dan duka.
17. Teman-teman PSDM 15/16 yang selalu memberikan cerita dan pembelajaran kepada penulis.
18. Anisya dan Rima yang selalu memberikan kesan baik dan semangat positif kepada penulis.
19. Teman-teman seperjuangan MT15 yang memberikan banyak cerita dalam kehidupan penulis.
20. Serta seluruh pihak yang belum bisa dituliskan satu per satu oleh penulis. Terimakasih atas dukungan dan bantuan teman-teman sekalian.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BIODATA PENULIS



Penulis lahir di Kota Batam pada tanggal 31 Januari 1995. Penulis merupakan anak pertama dari tiga bersaudara pasangan Andi Batarsyah dan Nurhasiah. Penulis telah menempuh pendidikan formal di SDN 003 Tg. Sengkuang Batam, SMPN 4 Batam, dan SMAN 1 Batam. Setelah lulus dari jenjang SMA pada tahun 2013, penulis melanjutkan pendidikan ke jenjang perguruan tinggi di Jurusan Teknik Material dan Metalurgi Institut Teknologi Sepuluh nopember Surabaya.

Semasa kuliah penulis aktif mengikuti kegiatan organisasi, pelatihan, dan seminar. Penulis pernah menjabat sebagai staff Departemen Pengembangan Sumber Daya Mahasiswa HMMT FTI-ITS 2014/2015 dan Wakil Kepala Departemen Pengembangan Sumber Daya Mahasiswa HMMT FTI-ITS 2015/2016. Selain itu penulis sempat aktif sebagai Asisten Laboratorium Fisika Material dan Laboratorium Metalurgi di Jurusan Teknik Material dan Metalurgi.

Penulis memiliki pengalaman kerja praktek di PT. McDermott Indonesia Batam Fabrication pada bulan Juli-Agustus 2016. Selama kerja praktek penulis mendalami topik terkait “Studi Aplikasi Pengendalian Korosi Menggunakan Teknik Pelapisan dengan Metode Pengecatan pada Yamal LNG di PT. McDermott Indonesia”.

Tugas akhir yang diambil penulis dalam bidang Korosi dan Analisa Kegagalan berjudul “Analisis Kegagalan *Water Injection* pada *Vertical Roller Mill* di *Finish Mill* PT. Holcim Tuban Plant Indonesia”.

Email: dikapt31@gmail.com

(Halaman ini sengaja dikosongkan)